



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

Eesti elektrisüsteemi laiseiresüsteemi arendamine ja analüüs (WAMPAC)

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

Tallinn 2014

Uurimistöö osapooled:

Ivo Palu	dotsent, tellimustöö vastutav täitja, TTÜ elektroenergeetika instituut
Kaur Tuttelberg	doktorant, nooremteadur, TTÜ elektroenergeetika instituut
Triin Kangro	doktorant, nooremteadur, TTÜ elektroenergeetika instituut
Tanel Sarnet	doktorant, nooremteadur, TTÜ elektroenergeetika instituut



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	11
1. Andmeedastus ja sideprotokollid	13
1.1 Üldist	13
1.2 Andmesidevõrgud.....	14
1.3 Sideprotokollid	23
1.4 Laiseirerakenduste andmeedastus.....	29
1.5 Kokkuvõte	32
1.6 Kirjandus	32
2 Ülekandeliinide jälgimine faasimõõturitega	34
2.1 Ülekandeliini soojusliku talitluse hindamine meteoroloogiliste mõõtmiste baasil ...	35
2.1.1 Lähteandmed	35
2.1.2 Arvutuslikud näited	36
2.1.3 Analüüs ja järeldused	37
2.2 Ülekandeliini parameetrite määratlemine.....	38
2.2.1 Teoreetiline taust	40
2.2.2 Modaalanalüüs	42
2.2.3 Transponeeritud liinid	45
2.2.4 Transponeerimata liinid.....	47
2.2.5 Suuruste eraldamine vähendatud maatriksitest	50
2.2.6 Arvutuslikud näited	52
2.2.7 Analüüs ja järeldused	58
2.3 Ülekandekadude estimeerimine.....	58
2.3.1 Arvutuslikud näited	59
2.3.2 Analüüs ja järeldused	63
2.4 Faasimõõtmiste mõõtemääramused.....	63
2.4.1 Komplekssuuruste mõõtemääramused	64
2.4.2 Võimsusvoog liini otsas	66
2.4.3 Ülekandekad liinis.....	68
2.4.4 Liiniparameetrite lihtsustatud hinnang.....	69
2.4.5 Arvutuslikud näited	70
2.4.6 Analüüs ja järeldused	75
2.5 Kokkuvõte	75

2.6	Kirjandus	76
3	Elektrisüsteemi laiseire ja selle optimeerimine	80
3.1	Oleku estimateerimine ja faasimõõtmised.....	80
3.1.1	Arvutuslikud näited	81
3.1.2	Analüüs ja järeldused	85
3.2	Faasimõõturite optimaalne paigutus.....	85
3.2.1	Optimaalse paigutuse ülesanne	86
3.2.2	Harude jälgitavus.....	88
3.2.3	Optimaalsed lahendused.....	92
3.3	Kokkuvõte	94
3.4	Kirjandus	94
4	Ülekandevõrgu seire ja arengusuunad.....	96
4.1	Ülekandevõrgu operatiivjuhtimine	96
4.2	Ülekandevõrgu juhtimise tugi	106
4.2.1	Püsitalitluse analüüs ja estimateerimine.....	106
4.2.2	Koormuse seire.....	116
4.2.3	Talitluse arvutusprogrammid	118
4.2.4	Püsitalitluse häiringuanalüüs.....	120
4.2.5	Talitluskindluse hindamine reaajas	124
4.2.6	Energia tootmise ohjamine.....	127
4.3	Elektrisüsteemi stabiilsus	132
4.4	Sageduse ja pinge reguleerimine	139
4.5	Laimõõtesüsteem	148
4.5.1	Sünkroonitud faasimõõtmised.....	148
4.5.2	Laimõõtesüsteemi rakendused	153
4.6	Laijuhtimissüsteemid.....	158
4.6.1	Üldist	158
4.6.2	Laikaitse ja -juhtimise rakendused maailmas.....	163
4.6.3	Võimalikud rakendused Eesti elektrisüsteemis.....	165
4.7	Kokkuvõte	167
4.8	Kirjandus	168
5	Elektrisüsteemi elementide dünaamilised mudelid ja nende verifitseerimine	171
5.1	Sünkroonmasinad	171
5.2	Elektrivõrgu koormus	190

5.3	Regulaatorid.....	193
5.3.1	Ergutussüsteemid	193
5.3.2	Turbiinide kiirusregulaatorid.....	201
5.4	Võrguarvutustarkvarade standardsed mudelid	204
5.5	Mudelite verifitseerimine	206
5.6	Süsteemi mudelite verifitseerimine laimõõtmiste abil	209
5.7	Kokkuvõte	211
5.8	Kirjandus	211
	Kokkuvõte	221
	Lisa 1 Uurimistöö tulemusel avaldatud teaduslikud artiklid.....	224

Joonis 1.1. Nõuded andmeedastuse kiirusele erinevate tarkvõrgu rakenduste korral [2]	14
Joonis 1.2. Avatud süsteemide OSI mudel.....	24
Joonis 1.3. TCP/IP- ja OSI-mudelite võrdlus.....	25
Joonis 1.4. Viited laiseirerakenduste kasutamisel. [11]	31
Joonis 2.1. Liini temperatuuri hinnang arvatud mõlema mudeli alusel iga vaatluspunkti andmetest eraldi, tähistatud kui erinevad liinilõigud.	37
Joonis 2.2. Liini läbilaskevõime hinnang arvatud mõlema mudeli alusel iga vaatluspunkti andmetest eraldi. Kogu liini läbilaskevõimeks on võetud neljast väärtusest vähim.	37
Joonis 2.3. Liini takistuse hinnang arvatud mõlema mudeli alusel iga vaatluspunkti andmetest eraldi. Liinijuhi keskmine takistus on leitud nelja väärtuse keskmisena.	38
Joonis 2.4. Suhteline muutus teisendusmaatriksite elementides juhi temperatuuri muutumisel. Pidev joon tähistab elemendi reaal- ja kriipsjoon imaginaarkomponenti.	49
Joonis 2.5. Suhteline muutus teisendusmaatriksite elementides maapinna eritakistuse varieerumise korral. Pidev joon tähistab elemendi reaal- ja kriipsjoon imaginaarkomponenti.	49
Joonis 2.6. Liini aktiivtakistus pikkusühiku kohta, 3.09.2014. Toodud on otse faasisuurustest (A, B, C) ning pärijärgnevuskomponentidest (D+) leitud suurused ja modaalteisendusega leitud suurus (M+).	53
Joonis 2.7. Liini aktiivtakistus pikkusühiku kohta, 24.11.2014. Toodud on otse faasisuurustest (A, B, C) ning pärijärgnevuskomponentidest (D+) leitud suurused ja modaalteisendusega leitud suurus (M+).	53
Joonis 2.8. Liini induktiivtakistus pikkusühiku kohta, 3.09.2014. Toodud on otse faasisuurustest (A, B, C) ning pärijärgnevuskomponentidest (D+) leitud suurused ja modaalteisendusega leitud suurus (M+).	54
Joonis 2.9. Liini induktiivtakistus pikkusühiku kohta, 24.11.2014. Toodud on otse faasisuurustest (A, B, C) ning pärijärgnevuskomponentidest (D+) leitud suurused ja modaalteisendusega leitud suurus (M+).	54
Joonis 2.10. Liini põikaktiivjuhtivus pikkusühiku kohta, 3.09.2014. Toodud on otse faasisuurustest (A, B, C) ning pärijärgnevuskomponentidest (D+) leitud suurused ja modaalteisendusega leitud suurus (M+).	55
Joonis 2.11. Liini põikaktiivjuhtivus pikkusühiku kohta, 24.11.2014. Toodud on otse faasisuurustest (A, B, C) ning pärijärgnevuskomponentidest (D+) leitud suurused ja modaalteisendusega leitud suurus (M+).	55

Joonis 2.12. Liini põikmahtuvusjuhtivus pikkusühiku kohta, 3.09.2014. Toodud on otse faasisuurustest (A, B, C) ning pärijärgnevuskomponentidest (D+) leitud suurused ja modaalteisendusega leitud suurus (M+).	56
Joonis 2.13. Liini põikmahtuvusjuhtivus pikkusühiku kohta, 24.11.2014. Toodud on otse faasisuurustest (A, B, C) ning pärijärgnevuskomponentidest (D+) leitud suurused ja modaalteisendusega leitud suurus (M+).	56
Joonis 2.14. Suhtelised vead mõõdetud liiniparameetrites, 3.09.2014. Viga on toodud aktiivtakistuses mõõdetuna otseselt igast faasist (A, B, C) ja pärijärgnevussuurustest (D+) ning leitud modaalteisenduste abil (M+). Võrdluseks on toodud faasisuurustest otse mõõdet	57
Joonis 2.15. Suhtelised vead mõõdetud liiniparameetrites, 24.11.2014. Viga on toodud aktiivtakistuses mõõdetuna otseselt igast faasist (A, B, C) ja pärijärgnevussuurustest (D+) ning leitud modaalteisenduste abil (M+).	57
Joonis 2.16. Aktiivkaod liini faasides, 3.09.2014. Pidevad jooned tähistavad otseseid mõõtmisi, kriipsjooned aga aktiivtakistuse referentsväärtuse alusel faasimõõtmistest arvutatud väärtusi.	60
Joonis 2.17. Aktiivkaod liini faasides, 21.11.2014. Pidevad jooned tähistavad otseseid mõõtmisi, kriipsjooned aga aktiivtakistuse referentsväärtuse alusel faasimõõtmistest arvutatud väärtusi.	60
Joonis 2.18. Summaarsed aktiivkaod liinis, 3.09.2014. Võrreldud on otsest mõõtmist ja referentstakistuse alusel arvutatud tulemust.	61
Joonis 2.19. Summaarsed aktiivkaod liinis, 21.11.2014. Võrreldud on otsest mõõtmist ja referentstakistuse alusel arvutatud tulemust.	61
Joonis 2.20. Summaarne reaktiivvõimsuste vahe liini kahe otsa vahel, 3.09.2014. Reaktiivkaod on leitud nii ainult otsestest mõõtmistest kui ka referentstakistust ja -juhtivust kasutades.	62
Joonis 2.21. Summaarne reaktiivvõimsuste vahe liini kahe otsa vahel, 21.11.2014. Reaktiivkaod on leitud nii ainult otsestest mõõtmistest kui ka referentstakistust ja -juhtivust kasutades.	62
Joonis 2.22. Summaarne võimsus Liini L511 Balti AJ poolses otsas.	71
Joonis 2.23. Faaside võimsused liini L511 Balti AJ poolses otsas.	71
Joonis 2.24. Summaarsed aktiivvõimsuse kaod liinis L511.	72
Joonis 2.25. Faaside aktiivvõimsuse kaod liinis L511. Musta joonega on toodud referentstakistuse alusel hinnatud kaod.	72
Joonis 2.26. Liini L511 mõõdetud aktiivtakistus.	73

Joonis 2.27. Liini L511 mõõdetud induktiivtakistus.....	73
Joonis 2.28. Liini L511 mõõdetud aktiivjuhtivus.	74
Joonis 2.29. Liini L511 mõõdetud mahtuvusjuhtivus.....	74
Joonis 3.1. Näide sellest, kuidas sõlmede jälgimiseks optimaalseks osutunud harudele tegelike faasimõõturite paigaldamine mõjutab liinide otsest jälgitavust.	89
Joonis 3.2. Olemasolevad, praeguseks planeeritud (mõlemad tähistatud mustade ringidega) ning nelja optimeerimisülesande lahendusena paigutatud faasimõõturid (tähistatud värviliste ringidega).	93
Joonis 4.1. Elektrisüsteemi talitluse liigitus ja juhtimise eesmärgid.....	98
Joonis 4.2. Eesti elektrisüsteemi eraldusautomaatika põhimõtteskeem.....	105
Joonis 4.3. Seisundi estimeerimise protseduur.....	113
Joonis 4.4. Ruutfunktsiooni estimeerimine.	115
Joonis 4.5. Rikete tagajärgi.	122
Joonis 4.6. Elektrisüsteemi häiringukindluse analüüs.....	124
Joonis 4.7. Elektrisüsteemi talitluskindluse jooksev hindamine.	125
Joonis 4.8. Töösolevate agregaatide võimsuse muutumine ööpäeva kestel.....	129
Joonis 4.9. Elektrisüsteemi stabiilsuse klassifikatsioon.....	133
Joonis 4.10. Võimalikud tulemused lihtsaima elektrisüsteemi seisundi määramisel.....	133
Joonis 4.11. Elektrisüsteemi stabiilne (a) ja mittestabiilne (b) siirdeprotsess.....	135
Joonis 4.12. Asünkroonmootori karakteristik.	136
Joonis 4.13. Pinge stabiilsuse olukordi.	136
Joonis 4.14. Turbiini ja koormuse sageduskarakteristikud.	140
Joonis 4.15. Sageduse reguleerimise toimingud.	141
Joonis 4.16. Sageduse siirdeprotsess.....	142
Joonis 4.17. Ühendsüsteemi piirkonnad.....	143
Joonis 4.18. Pinge sekundaarregulaatori toimeskeem.....	147
Joonis 4.19. Faasimõõturi toimimispõhimõte.	149
Joonis 4.20. Laimõõtesüsteemi arhitektuur.....	152
Joonis 4.21. Laimõõtesüsteem.	152
Joonis 4.22. Laimõõtesüsteemi rakendusvaldkonnad.	154
Joonis 4.23. Laiseiresüsteemi rakendusi.	157
Joonis 4.24. PSS toime võimsuste piirkonnavahelise võnkumise summutamisel.	160
Joonis 4.25. WACS elektrisüsteemi viimiseks saartalitlusse.....	161
Joonis 4.26. WACS elektrisüsteemi koormuse avariiliseks vähendamiseks.	161

Joonis 5.1. Ühe mähisega magnetahel.	172
Joonis 5.2. Kahe mähisega magnetahel.....	172
Joonis 5.3. Sünkroonmasina staatori- ja rootoriahelad.	173
Joonis 5.4. a-faasi magnetomotoorjõud ja selle komponendid.	175
Joonis 5.5. d-telje (a) ja q-telje (b) aseskeemid.....	178
Joonis 5.6. Ergutusvoolu muutus tingituna staatori lühisest.	180
Joonis 5.7. Staatorivoolu perioodiline komponent.....	181
Joonis 5.8. Tühijooksu- ja lühisekarakteristik.....	181
Joonis 5.9. Võnkumisvõrrandi plokk skeem.	184
Joonis 5.10. Aseskeem vahetult pärast talitlushäiringut.	185
Joonis 5.11. Aseskeem mittevõrdsete vastastikuste induktiivsuste korral.	186
Joonis 5.12. Staatori d- ja q- telje aseskeemid.	189
Joonis 5.13. Staatilised ja dünaamilised koormused.	192
Joonis 5.14. Sünkroongeneraatori ergutussüsteemi põhimõtteskeem.....	195
Joonis 5.15. Ergutussüsteemi juhtimis- ja kaitsefunktsioonid.	197
Joonis 5.16. Sünkroonmasina tühijooksukarakteristikud.....	199
Joonis 5.17. DC1A tüüpi ergutussüsteemi mudel.	200
Joonis 5.18. Auruturbiini konfiguratsioon.	202
Joonis 5.19. Auruturbiini plokk skeem.	203
Joonis 5.20. Sünkroongeneraatori mudel PSCAD tarkvaras.....	205
Joonis 5.21. Generaatori väljundpinge muutus pinge referentsväärtuse muutumisel +/- 10%	208
Joonis 5.22. Generaatori väljundpinge muutus pinge referentsväärtuse muutumisel +10%. 208	
Joonis 5.23. Võimsusvoogude muutus piirkondade vahelisel ühendusel enne (a) ja pärast (b) mudeli verifitseerimist.[17].....	210
Joonis 5.24. Võnkeprotsesside jälgimine kasutades kohalikke mõõtmisi (vasak joonis) ja laimõõtesüsteemi (parem joonis) vahendusel saadud mõõtmisi. [18].....	210

Tabel 1.1. Sidemeediate omadused.	21
Tabel 1.2. Juhtmega andmesideühenduste võrdlus.[4]	22
Tabel 1.3. Juhtmeta andmesideühenduste võrdlus. [4]	22
Tabel 1.4. Nõuded andmeedastusele erinevate rakenduste korral [2]......	30
Tabel 1.5. Nõuded andmeedastusele ja latentsusele. [10].....	31
Tabel 1.6. Ülekandekiiruse vajadus erinevate PMU seadistuste korral [7].	31
Tabel 1.7. Kokkuvõtte võimalikest viidetest ning nende tüüpilistest vahemikest.[7].....	32
Tabel 2.1. Ilmavaatluspunktide mõõteandmed 3. septembrist 2014. aastal.	36
Tabel 3.1. Kasutatud liiniparameetrid.	81
Tabel 3.2. Mõõdetud pingefaasorid süsteemi sõlmedes (nurgad sõlme Eesti (L373) suhtes). 82	
Tabel 3.3. Mõõdetud aktiivvõimsuse (MW) ja reaktiivvõimsuse (Mvar) vood liinide otstes. 82	
Tabel 3.4. Liini teise otsa faasimõõtmistest estimateeritud pingefaasorid süsteemi sõlmedes (nurgad sõlme Eesti (L373) suhtes).	83
Tabel 3.5. Liini teise otsa faasimõõtmistest estimateeritud aktiivvõimsuse (MW) ja reaktiivvõimsuse (Mvar) vood liinide otstes.	83
Tabel 3.6. Pingefaasoritest estimateeritud aktiivvõimsuse (MW) ja reaktiivvõimsuse (Mvar) vood liinide otstes.....	84
Tabel 3.7. Pingefaasoritest estimateeritud aktiivvõimsuse (MW) ja reaktiivvõimsuse (Mvar) kaod liinidel.....	84
Tabel 4.1. Elektrisüsteemi talitluse liigid.....	97
Tabel 4.2. Püsiseisundite arvutamise eesmärgid.....	107
Tabel 4.3. Elektrivõrgu aseskeemi sõlmede tüübid.....	110
Tabel 4.4. Optimeerimisülesannete ajaline hierarhia.....	128
Tabel 4.5. WAMS ja WAMC toime talitluse erinevates olukordades.....	157
Tabel 4.6. Erinevate rakenduste nõuded infoliikumise kiirusele.....	163
Tabel 4.7. Laimõõtmistel põhinevate rakenduste võrdlus.....	165
Tabel 5.1. Sünkroongeneraatorite parameetrid.....	187
Tabel 5.2. Koormuskomponentide staatilised karakteristikud.....	193
Tabel 5.3. Koormusklasside staatilised karakteristikud.....	193

Sissejuhatus

Elektrisüsteemide ja selle juhtimisega seotud infosüsteemide areng on viimastel aastatel olnud kiire. Olulisel kohal on turgude avanemine ja moodsate elektrisüsteemi talitlust juhtida võimaldavate seadmete lisandumine. Kõik see tingib suurenenud vajaduse elektrisüsteemi veelgi täpsemaks juhtimiseks ja toimuvate protsesside analüüsimiseks. Tänapäeva moodsaks lahenduseks on laimõõtmistel põhinevate lahenduste kasutamine ning seeläbi efektiivsem olemasoleva vara kasutamine, millega kaasneb tarbijate suurem varustuskindlus. Siiski tuleb siinkohal arvestada, et selliste moodsate lahenduste kasutamine on maailma tasemel veel suhteliselt tagasihoidlik ja mitmes kohas arendusfaasis. Oluline tingimus, mida siinkohal arvestatakse on, et paljud lahendused ja rakendused sõltuvad konkreetsest elektrisüsteemist ja selle omapidamisest.

Laimõõtmised ja nende rakendamine elektrisüsteemi jälgimiseks ja analüüsiks on tänapäeval muutunud üheks oluliseks osaks elektrisüsteemi juhtimisel. Viimase kümne aasta areng selles valdkonnas on olnud kiire. Algselt kasutusel olnud triviaalne mõõteandmete kogumise ja analüüsi süsteem on muutunud süsteemiks, mille vahendusel on võimalik reaajas hinnata elektrisüsteemi talitlust. Tuleviku arengusuundadena on näha laimõõtmiste rakendamist ka elektrisüsteemi automaatse juhtimise ja kaitse valdkondades. Elering AS hankis endale laimõõtesüsteemi 2010. aastal. Viimased aastad on näidanud vajadust antud süsteemi täiendavalt arendada, analüüsida selle rakendatavust elektrisüsteemi juhtimisel ja kasutada seda ühe osana uues süsteemikaitse kontseptsioonis.

Tulenevalt eelnevast alustasid Elering AS ja TTÜ elektroenergeetika instituut 2013. aastal koostööd laimõõtmistel põhinevate andmete efektiivsemaks kasutamiseks ning otsimaks võimalusi nende kasutamiseks Eesti elektrisüsteemi operatiivsel planeerimisel ja juhtimisel. Käesolev aruanne on uurimistöö „Eesti elektrisüsteemi laiseiresüsteemi arendamine ja analüüs“ teise etapi kokkuvõte.

Uurimistöö teist etappi kokkuvõtvas aruandes käsitletakse laimõõtmiste omadusi ja kasutatavust lähtudes infoedastuse kitsendustest, vaadeldakse ülekandeliinide läbilaskevõimet ja kadude määramist reaajas ja samuti PMU-de kasutamise optimeerimist elektrisüsteemi talitluse hindamisel ja juhtimisel. Täiendavalt antakse ülevaade laiseiresüsteemi võimalikest rakendustest arvestades avariitõrjeautomaatika ja elektrisüsteemi dünaamiliste mudelite verifitseerimise aspekte. Lähtuvalt uurimistöö eesmärgist võimaldada tulevikus jätkata käsitletavat teematikat ning uurida laiseirel põhinevat elektrisüsteemi talitluse analüüsi ja juhtimist reaals

ajasimulaatoriga on käesoleva aruande lisas esitatud tehnilised nõuded sellise süsteemi tarvis. Aruande lõpus on esitatud kokkuvõtte ning ülevaatlikult käsitletud uurimistöö järgmiste etappide võimalikku temaatikat.

Teostatud uurimistöö baasil on koostatud mitmeid teaduslikke artikleid. Kaks artiklit on juba avaldatud ning kolm on saadetud järgmise aasta olulisematele konverentsidele. Samuti on uurimistöö tulemuste baasil koostamisel kaks teaduslikku ajakirja artiklit, millede esitamine on plaanitud järgmise aasta kevadesse. Kokkuvõtted artiklitest on esitatud aruande lisas 1.

Käesoleva aruande tulemusi on soovituslik lugeda koos uurimistöö esimese etapi aruandega, kuna temaatikad on omavahel tugevalt seotud ning nii mõnigi teoreetiline taust ja selgitus on esitatud eelmise etapi aruandes. Sellest tulenevalt on käesolevas aruandes lisatud viited eelmise aruande punktidele, mis on olulised mõistmaks selles aruandes teostatud teadustööd ning arvutusi, mis näitlikustavad teooriate rakendamist reaalses elektrisüsteemis. Tulenevalt uurimistöö tulemustest saab järeldada, et konkreetsemate järelduste tegemiseks on uurimistööd tarvis jätkata ning vaadelda erinevate komponentide ja mõjude ulatust lõpptulemusele ning alles seejärel on võimalik täpsemalt hinnata erinevate rakenduste sobilikkust kasutamiseks elektrisüsteemi reaalseks juhtimiseks.

1. Andmeedastus ja sideprotokollid

1.1 Üldist

Elektrivõrkude paiknemine laial territooriumil eeldab toimivat ja töökindlat andmeedastust. Mõõteandmed ja signaalid on vaja reaalajas toimetada kohtadelt (alajaamadest) juhtimiskeskustesse ja vastupidi, edastada juhtimiskeskustest antavad korraldused seadmetele (lülitid, releekaitse- ja automaatikaseadmed). Üldisemalt vajatakse andmeedastust tööjaamade ja terminalide vahel, arvutite koht- ja kaugvõrke, hajustöötlust ja muud.

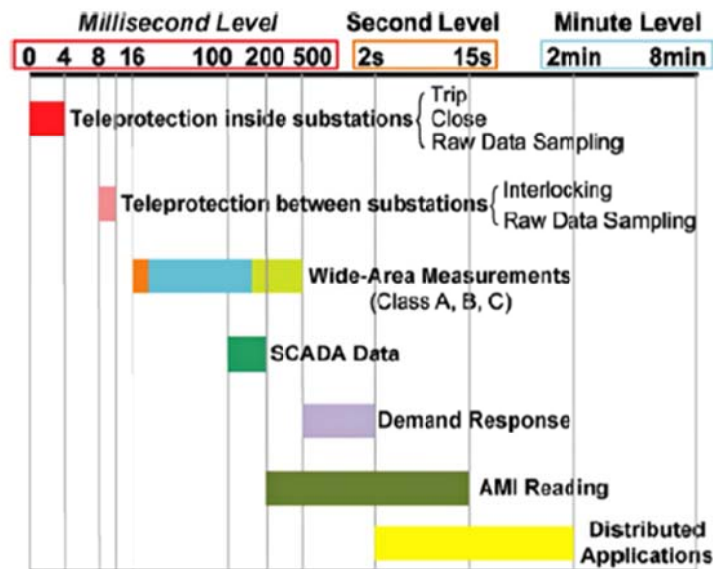
Elektrisüsteemi talitluse seire ja juhtimine on seni toimunud põhiliselt dispetšisüsteemi (SCADA) andmete alusel, diskreetimissammuga alates 1...2 sekundist. Kuna protsessid elektrisüsteemis kulgevad kiiresti, oleks vaja mõõtmisi mõnekümne millisekundilise sammuga. Levimas on sünkroniseeritud faasimõõteseadmed (PMU), mis mõõdavad pingeid ja voole elektrivõrgus, mille sagedus on suurusjärgus 10 kHz. Faasimõõtmised varustatakse ajamärkenditega ja edastatakse tavaliste andmesidekanalite kaudu kontsentraatoritesse, mis elektrivõrgu eri paikadest saabunud andmed kooskõlastavad. Täpne mõõteaeg saadakse globaalse positsioneerimissüsteemi (GPS) satelliitide kaudu saabuvate ajasignaali abil.

Süsteemiülesed andmete võrdlused toimuvad ühes sõlmpunktis ning seega on andmeid ülekandev sidesüsteem laimõõtmiste hädavajalik tugi. Kui laiseiresüsteemi tarvis kõlbab mistahes andmeedastussüsteem, siis laijuhtimissüsteem vajab piisavalt kiiret sidet. Sideaeg alla 200 ms on saavutatav protokolliga TCP/IP rakendamiseks, kuid alla 20 ms ei saavutata ka erikanalite korral. Laijuhtimissüsteem vajab alati erikanaleid.

Andmeedastusel on olulised kanali läbilaskevõime ja latentsus. Latentsus on ajavahe, mis tekib paketi saatja poolt tee panemise ja vastuvõtja poolt vastuvõtmise vahel. Lokaalvõrgu puhul on see reeglina niivõrd väike, et temaga mingeid probleeme ei ole (< 10 ms). Kaugvõrgu puhul tekib viivis pakettide kandmisest pikkade vahemaade taha ja sellest, et tihti on kaugvõrgus kahe otspunkti vahel mitmeid vahejaamu, mis paketti töötlevad. Iga selline töötlemine võtab oma aja ning lõpptulemusena võib kaugvõrkude puhul latentsus olla 100 – 500 ms vahel. Latentsuse tõttu võib tekkida olukord, kus rakendus, mis vahetab palju väikeseid pakette, ei suuda üle kaugvõrgu normaalselt töötada, kuna lõpptulemusena kasvab ooteaeg liiga suureks [1].

Edastatavad andmehulgad ei ole laimõõtmiste korral eriti suured. Küll aga võivad mõned rakendused, näiteks juhtimisülesanded, nõuda väikest latentsusaega. Kasutatavad on põhi-

mõtteliselt kõik sideliinid. Ülekaalukalt paremaks on siiski fiiberoptilised kaablid, kus pole probleeme läbilaskevõimega ega häiringutega. Joonisel 1.1 on näidatud nõuded andmeedastuse kiirusele erinevate tarkvõrgu rakenduste korral ning need võivad ulatuda millisekunditest minutiteni. Näiteks laimõõtmiste korral arvestatakse millisekunditega.



Joonis 1.1. Nõuded andmeedastuse kiirusele erinevate tarkvõrgu rakenduste korral [2]

1.2 Andmesidevõrgud

Selleks, et arvutid omavahel suhelda saaksid, peab olema olema mingi meedia, mida mööda saab signaale vahetada ning mille abil toimub reaalne signaalide liikumine ühest seadmest teise [1]. Eristada saab kahte meedialiiki – traadiga (vaskkaabel, fiiberoptika, elektriliinid) ja traadita ühendus (raadio ja satelliitside). Võttes arvesse ühenduse usaldusväärsust, turvalisust ja töökindlust ning läbilaskevõimekust on eelistatum traadiga ühendus. Samuti on traadiga ühendus üldiselt odavam. Teisalt võimaldab traadita ühendus kokku hoida kaablite paigaldamise kulusid ja võimaldab seeläbi lihtsamat olemasolevat võrku laiendada või uut võrku tekitada.

Andmeside aluseks on sideliinid ja -võrgud. Elektrivõrkude operatiivjuhtimisel on kasutusel nii traadiga kui ka traadita side raadiolainete vahendusel. Põhilisteks sideliinideks on:

- vaskjuhtmetest keerdpaar (tavaline telefoniliin)
- koaksiaalkaabel
- valguskaabel (kiudoptiline kaabel)
- kõrgsagedusside (PLC, DLC, BPL)
- traadita andmeside (kohtvõrgud)

- mobiiltelefon
- raadioside
- paketraadiovõrk
- mikrolaineside
- satelliitside.

Sideliinis (kaablis) muutuvad signaalid sumbuvuse ja viivituse tõttu, mida tingivad kaod ja mahtuvus. Lisanduvad ka mitmesugused mürad. Esineb ülekoste, kui kaablis on mitu soont või kaablid asetsevad lähestikku. Mürasid ja ülekostet aitab vähendada kaablite varjestus.

Tavalist numbrivalimisega telefonivõrku kasutatakse näiteks jaotusvõrgu tasemel sidepidamiseks tarbijatega. Vastavate modemite töökiirus ulatub 64 kbit/s ja enam. Probleemiks on side loomine, mis võib kesta kümneid sekundeid ka siis, kui liin on vaba. Lisavõimaluseks on kõrgsageduse (*Data Over Voice, DOV*) kasutamine, mis ületab telefonisageduse (3400 Hz). Selline sagedus ei häiri telefoniühendust. Vajalikud on vastavad modemid, saavutatav töökiirus on 9600 bit/s ja enam. Side luuakse DOV-modemi korral viiteta. Operatiivjuhtimise muudel eesmärkidel (nt juhtimiskeskuse ja alajaama vahelise side loomisel) on võimalik rakendada ka pakettkommuteerimise põhimõtteid, kus sõnum jaotatakse plokkideks ja edastatakse hetkel vaba marsruuti pidi. Saavutatav töökiirus on piisav (128 kbit/s ja enam), kuid nõuab sidevõrgus sellekohast tehnikat. Avaliku telefonivõrgu otsene rakendamine operatiivjuhtimise eesmärgil on võimalik sideliinide (juhtmepaaride) jäiga, mittekommuteeriva ühendamisega, mis tagab viivituseeta side ning töökiirus võib ulatuda kuni 100 Mbit/s.

Andmeside DSL (*Digital Subscriber Line*) on loodud vaskaablipõhistele telefoniliinidele. Telefoniühendusena kasutatakse madalsagedust (kuni 4 kHz), andmeedastuseks kõrgemaid sagedusi (kuni 1 MHz). Võrgust kasutajani suunduvat edastust nimetatakse allavooluks ja kasutajast võrku suunduvat ülesvooluks. Sümmeetriliste tehnoloogiate puhul on allavoolu ja ülesvoolu ribalaiused samasugused, asümmeetriliste puhul erinevad. DSL peresse kuuluvad mitmed tehnoloogiad: ADSL (*Asymmetric Digital subscriber Line*), IDSL (*Integrated service Digital Network*), VDSL (*Very high speed DSL*) jt.

Koaksiaalkaabli läbilaskevõime ületab tunduvalt vaskjuhtmetest keerdpaari näitaja, ulatudes 100 Mbit/s. Ka tegevusraadius on koaksiaalkaabli korral suurem, ulatudes 500 meetrini vaskjuhtme 100 m asemel. Kasutusel on kaht tüüpi koaksiaalkaabel – peenike (läbimõõt 5 mm) ja jäme (1 cm). Esimese tegevusraadius on 185, teisel 500 meetrit. Koaksiaalkaableid kasutab

muuhulgas kaabeltelevisioon. Tänapäeval asendavad koaksiaalkaableid enamasti valguskaablid.

Varjestamata keerupaar on vaieldamatult Eestis kõige enam levinud meedia. Tegemist on kõige odavama ja samas küllalt lihtsalt paigaldatava meediaga, mida on võimalik kasutada mitmete erinevate võrgutüüpide poolt. Samas võimaldab varjestamata keerupaar ka küllalt suuri andmeedastuskiirusi.

Valguskaablis (fiiberoptiline kaabel) levivad digitaalandmed optilist kiudu (valgusjuhti) pidi moduleeritud valgusimpulssidena. Sideks kasutatakse laserikiirgust lainepikkusega 600...1600 nm. Valguse kasutamine sideks on võimalik selle tõttu, et valgusküsi toimub valguslainete täielik sisepeegeldus. Sisepeegeldus saavutatakse valguskiu materjalist väiksema murdumisnäitajaga materjali kasutamise kiu ümbrisena. Kiu läbimõõt ei ületa mõndasada μm , ümbris on umbes 10 korda jämedam. Kaablis võib olla palju valguskiude. Mehaanilise tugevuse saavutamiseks valatakse kiud plastkattesse või pannakse alumiiniumtorusse, mis ilmastikumõjude vähendamiseks täidetakse vetthüljava pastaga. Valguskiuna kasutatakse plasti, klaasi sujuvkiudu või monomoodkiudu. Plastikuga kaabel võimaldab kasutada kõiki lainepikkusi, kuid ilma võimenduseeta saab ühendada seadmeid kuni 50 m kauguseni. Klaasi sujuvkiu korral kasutatakse laine alast teatud piirkonda, kusjuures seadmete vahekaugus võib ulatuda mõne kilomeetrini. Monomoodkiud eeldab fikseeritud lainepikkusega laserikiirgust, kuid seadmete vahekaugus võib ulatuda poolesaja kilomeetrini. Sumbuvuse vähendamiseks peab valguskiu läbimõõt olema kooskõlas sideks kasutatud valguse lainepikkusega. Fiiberkaablis võib kasutada erinevaid lainepikkusi näiteks erinevate kanalite või eri suundade (dupleksühendus) jaoks. Sõltuvalt kaabli tüübist on võimalik kaabli pikkus 2...100 km.

Valguskaablite paigutamiseks olemasolevatele elektriliinidele on kolm moodust:

- valguskaablit sisaldava piksekaitsetrossi kasutamine
- valguskaabli kerimine ümber õhuliini juhtme
- valguskaabli monteerimine õhuliini mastidele.

Tänapäeval valmistatakse erineva ehitusega mitmekiulist valguskaablit sisaldavaid piksekaitsetrosse. Tehniliselt on see parim lahendus, sest nii on valguskaabel hästi kaitstud mehaaniliste ja ilmastikumõjude eest. Pikselööride termilist mõju vähendab juhtme pinnaefekt ja valguskiu ümbrise halb soojusjuhtivus. Valguskaabli kerge kaal ja väikesed mõõtmed ei muuda oluliselt piksekaitsetrossi kaalu ja mõõtmeid ega põhjusta ka täiendavaid jäitest või tuulest tingitud koormusi. Tõsi, valguskaabli vigastusi on raske parandada, kuid tavaliselt on kaablis

kiude rohkem kui üks, mistõttu vigastatud kiud on asendatav ja valguskaabli remondi võib ühitada liini remondiga. Lisakulutusi põhjustavad keskeltläbi iga poolesaja kilomeetri järel vajalikud optilised võimendid. Omaette monteeritavad valguskaablid on plastkattega ja vajavad toestust. Tavaliselt riputatakse nad terastrossile. Paigaldamisel peab arvestama ka tuulest ja jäitest tingitud lisakoormustega.

Valguskaablite laialdast kasutamist elektrisüsteemides soosib

- suur läbilaskevõime, mis ulatub juba nüüd kuni 400 Gbit/s ja võib edaspidi veelgi tõusta
- häirekindlus, kuna kiudoptilised materjalid on head dielektrikud ja infokandjaks on valgus, ei põhjusta elektromagnetiline induktsioon moonutusi edastatavas infos
- valguskaablitega ühendatud sideseadmed on galvaaniliselt eristatud, mistõttu nende maandamise probleemid on lihtsamad
- kiudoptilisi süsteeme kasutatakse laialdaselt avalikes sidesüsteemides, nende komponendid on kergesti kättesaadavad ja arendus jätkub
- olemasolevad õhuliinid sobivad valguskaablite paigaldamiseks.

Valguskaablite puudusteks on

- valgust juhtiva klaaskiu rabadus, mistõttu nad ei talu suuri tõmbe-, painde- ja väänd jõude
- suhteliselt keeruline kaablite ühendamise, mis nõuab suurt täpsust ning eriseadmeid
- sidemeediumi vahetus (valguskaabli üleminek metalljuhtmeks), mis nõuab opto-elektrilisi muundureid
- tundlikkus keskkonnamõjudele, näiteks madalatel temperatuuridel tekkivad mehaanilised deformatsioonid, mis suurendavad sumbumust.

Optiline kaabel on katsete käigus jõudnud kiiruseni 1 petabit sekundis (10¹⁵bits/s) 50 kilomeetrise vahemaa. Optiline kaabel on väga heade omadustega andmeside poolt vaadates, kui teisalt on sellel kõrge hind ning keerukas paigaldus. Optilises kaablis on andmeside kiirus võrdne valguse kiirusega klaasis, mis on umbes 180 000 kuni 200,000 km/s ning latentsusega 5 kuni 5,5 mikrosekundit kilomeetri kohta, ehk 1000 km vahemaa läbides on viivitus umbes 11 millisekundit [9]. Optilise kaabli eelis on ka tema immuunsus raadio ja atmosfääri häirete vastu ning samuti ühenduse väike ristlõige ja kõrge turvalisus. Optiline kaabel ja selle paigaldus on aga kallis ja nõuab suurt esmast investeeringut.

Andmeedastuseks saab kasutada kaabeltelevisioonivõrke, mis on ehitatud valgus- ja koaksiaalkaablite baasil. Nende väga lai ülekanderiba (50...860 MHz) on olulisel määral kasuta-

mata. Puuduseks on asjaolu, et kaabeltelevisioonivõrgud olid algselt kavandatud vaid ühesuunaliseks tööks ja need on vaja kohandada kahepoolse digitaalside jaoks.

Sideotstarbeks sobivad ka elektriliinid. Sellise kõrgsagedusside (*Power Line Carrier, PLC* või *Distribution Line Carrier, DLC* ka *Broadband over Power Line, BPL*) kandesignaali sagedus on 3...500 kHz. Jõusagedus (50 Hz) ja kandesagedus eraldatakse filtriga. Kõrgsagedusside töökiirus võib lühematel distantidel ulatuda kuni 100 Mbit/s. Ka töökindlus on üldjuhul kõrge, kuid side ei toimi, kui elektriliin on rikkis või remondis. Jaotusvõrgus rakendatakse kõrgsagedussidet tarbijate elektriarvestite kauglugemiseks. Siin on eeliseks täiendava sideliini puudumine, sest side toimub tavaliste elektrijuhtmete kaudu. Nüüdisaegsed digitaalsignaali kodeerimisviisid, näiteks ortogonaalse sagedusjaotusega multipleksimine, võimaldavad edukalt võidelda võrgus esineda võiva laia- ja kitsaribalise või impulssmüraga.

Elektriliine mööda toimuv andmeedastus toimub peamiselt mööda madal ja keskpinge elektrivõrku ning seda saab teoreetiliselt kasutada nii laimõõtmisteks, kui ka alajaamasises võrgus [8]. Tehnoloogia ei ole enam uus, aga endiselt selle kasutamisel hulgaliselt tehnilisi takistusi ning seetõttu ei soovitata selle tehnoloogia kasutamist kriitilistes lahendustes [4].

Arvutite kohtvõrkudes kasutatakse traadita andmesideks infrapuna- või laserikiirgust ja raadiosidet. Infrapunaside võib olla nii otsenähtavusega saatja ja vastuvõtja vahel kui ka hajus- või peegelduskiirgusega. Laserside vajab otsenähtavust. Neid sideliike kasutatakse ajutiste ja mobiilsete ühenduste loomiseks. Edastuskiirus on suur, tavaliselt 10 Mbit/s. Raadioside põhiriibas meenutab tavalisi ringhäälingusaateid, edastuskiirus on 5 Mbit/s. Lairibaedastusel on kiirus küll madalam, kuid see-eest on kasutatavate kanalite arv suur. Traadita side sobib muuhulgas ühenduse loomiseks kahe kohtvõrgu vahel, mille kaugus kuni 5 km. Traadita ühendused:

- IEEE 802.11 – *Wi-Fi (Wireless Fidelity)*. Kasutatakse sülearvutite ühendamiseks kohtvõrku. Ka traadita *Ethernet*.
- *WiMax (Worldwide Interoperability for Microwave Access)* – mõeldud pikemate vahemaade (kuni 50 km) ühendamiseks. Maksimaalne läbilaskevõime 70 Mbit/s.
- *Bluetooth* (IEEE 802.15) – kasutatakse pisiseadmete ühendamiseks omavahel.
- *GSM (Global System for Mobile communication)* – kasutatakse mobiiltelefonides. Andmeedastuseks on *GPRS (General Packet Radio Service)* kuni 107 Kbit/s ja *EDGE (Enhanced Data rate for GSM Evolution)* kuni 384 Kbit/s, *UMTS-süsteem (Universal*

Mobile Telecommunications System) kuni 2 Mbit/s ning HSDPA (*High Speed Downlink Packed Access*) kuni 42 Mbit/s.

Probleemiks on turvalisus. Kasutatakse krüpteerimist ja ligipääsu kontrolli (parool, võti).

Raadioside eeliseks on operatiivsus. Pole vaja numbrit valida ega ühendust oodata, nupule vajutades või sündmusest ajendatuna võib teate hetkega edastada. Ainus viide on saatele või vastuvõtule häälestumise aeg, mis tavaliselt jääb alla sekundi. Raadioside seadmed on mõeldud töötamiseks erinevateks tingimusteks ja need on hõlpsasti teiseldatavad. Eestis on raadioseadmete paigaldamiseks ja kasutamiseks enamasti vaja Tehnilise Järelevalve Ameti litsentsi. Austraalias, Lääne-Euroopas ja USA-s on hajutatud spektriga raadiomodemid litsentsivabad. Muud seadmed on litsentsivabad, kui nende väljundvõimsus vastab lubatule, milleks on kas 2 või 5 W. Selliste saatjatega saab sidet pidada kuni 50 km kaugusele. Kasutatavad sagedusribad on erinevad ja olenevad tootjamaast. Turul pakutavate toodete sageduse ülemine piir on 5,8 GHz, sidekiirused kuni 300 Mbit/s ja nad on enamasti isekohanduvad sideoludega, s.t häirete korral väheneb sidekiirus astmeliselt. Ribalaius on programmeeritav vahemikus 2,4...25 kHz. Raadiosidele on iseloomulik, et saade ja vastuvõtt toimuvad erineval sagedusel. Väljundvõimsus on valitav kas 2 või 5 W. Mõnel tootel on gradatsiooniliselt kuni 10 taset. Puuduseks on sõltuvus ilmastikust, eriti ülelevi.

Raadiolinke, infrapunaliideseid ning optilist kaablit kasutatakse tavaliselt siis, kui tavalise keerupaari kaabelduse kasutamine on kuidagi raskendatud või ebasoovitav. Raadiolingid võimaldavad oluliselt pikemaid vahemaid kui keerupaari kaabel, eriti sobiv kasutada kohtades, kus kaabli vedamine on mõttetult kulukas või siis võimatu.

Mikrolaineside on samuti maailmas populaarne lahendus andmete ülekandmiseks. Samas on digitaalne mikrolaineside (suurem andmeedastus kiirus ja väiksem mürasõltuvus) välja vahetamas analoogsidet. Digitaalset mikrolaineside saab liigitada kaheks – alla ja üle 10 GHz sagedusega raadioside vastava leviulatusega kuni 30 km ja vähem kui 5 km [10].

Satelliitside on praegu raadiosidest oluliselt kallim. Selle hind oleneb teenuse pakkujast, kelle satelliit piirkonna kohal asub. Kasutatav sagedusala on kümned või sajad gigahertsid. Tavaliselt pakutakse kaht liiki teenust VSAT ja TSAT. VSAT-teenus sobib kaugvõrgus suure läbilaskevõimega ühenduste loomiseks. VSAT-teenuse korral renditakse 64 kbit/s või selle kordne kanal ja andmed saadetakse kaugterminalist satelliidi võrgujaoturisse, mis suunab need teist kanalit mööda adressaadile. Terminali antenn on 1,8...2,2 m ja keskuse antenn 6 m läbimõõduga. Teenuse maksumus oleneb paigaldatud terminalide arvust ja kanalite läbilaske-

võimest, kuid ei olene terminalide asukohast ega ülekantud info mahust. TSAT-teenus on mõeldud firmasisese andmehõivesüsteemi loomiseks. Põhimõte on sama mis VSAT-il, kuid side kiirused on väiksemad (2400...16800 bit/s), mistõttu ka antennid on väiksemad (terminal 54...90 cm, keskus 120 cm) ja seadmed odavamad. Nii keskuses kui terminalides saab satelliitside seadmetega ühendada Hayes'i modemi abil kuni 64 ümberlülitatavat liini.

PMU andmeside tagamiseks on võimalik kasutada ka maalähedasel orbiidil olevaid satelliite ja nende pakutavat satelliitsidet. Andmeühendus on kallis, ühenduse maht piiratud ning olulise viivitusega. PMUdega andmeside pidamine on võimalik, aga pigem sobib see lahendus SCADA andmete edastamiseks kaugetest alajaamadest, mis ei ole aga teemaks Eestis [8].

Mobiiltelefonivõrk GSM koosneb kolmest osast:

- mobiilsed terminalid (telefonid), mida kannavad kliendid
- baas(tugi)jaamade süsteem, mille moodustavad raadiokanalite fikseeritud otspunktid ja mis juhivad sidet mobiiljaamadega
- raadiovõrk, mille kõige olulisema osa moodustab kanalite ümberlülitamise keskus ja mis loob ühenduse võrgu kasutajate vahel.

Süsteemi tööd jälgib juhtimiskeskus (*Operations and Maintenance Center, OMC*).

Mobiiljaam koosneb kaasaskantavast seadmest, milles asub vahetatav SIM-kaart (*Subscriber Identity Card*). Ilma selle kaardita, mis on ühtlasi mobiiljaama turvalukk, jaam ei toimi. SIM-kaarti saab kaitsta lubamatu kasutamise eest salasõna või kasutajat määrava numbriga (*Personal Identity Number, PIN*). SIM-kaardil on ka salajane kasutaja autentsuse võti ja muukraud (šifreeringu genereerimise ja autentsuse kontrolli algoritmid). Igal mobiiljaamal on oma rahvusvaheline seadme identifitseerimise kood (*International Mobile Equipment Identity, IMEI*) ja krüpteerimise algoritm. U_m -liides on aegmultipleksimise süsteem, mis määrab GSM-andmete formaadi, kasutatud sagedused, sidevigade korrigeerimise protseduurid ja multipleksimise formaadi. Tugijaam koosneb vastuvõtjast ja kontrollerist. Vastuvõtja hoolitseb side korraldamise eest mobiiljaamadega ja olenevalt kohalikest oludest (vajalikest sidekanalite arvust) võib tugijaamas olla vastuvõtjaid ka rohkem kui üks. Vastuvõtjad ühendatakse tugijaama ühe kontrolleriga, mis peab sidet kanalite ümberlülitamise keskusega. Keskus on GSM-süsteemi tähtsaim osa, mis toimib nagu tavaline telefonivõrgu (*Public Switched Telephone Network, PSTN*) keskjaam. Keskus tagab kogu vajaliku funktsionaalsuse, klientide registreerimise, autentsuse kontrolli, asukoha määramise, helistamise toimingud, saadetiste ülekande kusagil uitavatele klientidele, fikseerib side kasutamise aja, teeb vajalikud arveldused jm. HLR (*Home Location Register*) ja VLR (*Visitor Location Register*) koos keskusega

kindlustavad kliendi otsimise ja helistamise toimingud. Seadmete identifitseerimise register ja autentsuse kontrolli keskus tagavad võrgu turvalisuse. Autentsuse kontrolli keskus on kaitstud andmebaas, kus hoitakse kõiki SIM-kaartide võtmete koopiaid. Seadmete registris hoitakse hetkel kehtivat klientide nimekirja ja nende identifitseerimise koode. Mobiiljaamast loetud šifreeritud koodide dekrüpteerimise tulemuse võrdlemine andmebaasis talletatuga identifitseerib kliendi.

GSM-võrgu teenused leiavad üha laiemat kasutamist ka energeetikas. Näiteks jaotusvõrgu lüliteid juhitakse harva, mistõttu pole otstarbekas kasutada püsisideliine. Mõeldav on paigutada trafopunktidesse nüüdisaegne multifunktsionaalne arvesti, mis jälgib ka elektri kvaliteeti. Avastanud ebanormaalsuse, helistab GSM-jaam dispetšikeskusesse ning edastab mõõteriistas salvestatud andmed, analüüsib neid ja teeb ettenähtud lülitused. GSM-sidet kasutatakse veel tuuleelektrijaamade juhtimiseks, varuosade tellimiseks, kliendi teenindamiseks hulgi laos jne. Paljude dispetšisüsteemide tarnijate (ABB, Netcontrol, Siemens jt) sidekorraldus toetab GSM-sidet. Väiksemate andmehulkade ülekandmiseks võib kasutada SMS-teenust (*Short Message Service*), mis toimib paketedastuse põhimõttel. Teise põlvkonna GSM mobiilside asendatakse täna 3.5G põlvkonna HSDPA võrkudega 900 MHz sagedusalas ning perspektiivis on neljanda põlvkonna ehk 4G sidevõrgud 2,5...2,6 GHz sagedusalas. Ühtlasi tõuseb tunduvalt edastuskiirus, mis peale kõne- ja andmeside võimaldab edastada ka audio- ja videoinformatsiooni. Erinevate sidemeediate omadusi on kokkuvõtlikult iseloomustatud tabelis 1.1.

Tabel 1.1. Sidemeediate omadused.

Meedia	Hind	Paigaldamine	Läbilaskevõime Mbit/s	Sumbuvus km	Häirekindlus
Varjestamata paar	Madal	Lihtne	100	0,1	Halb
Varjestatud paar	Mõõdukas	Lihtne	155	0,1	Hea
Koaksiaalkaabel	Mõõdukas	Lihtne	500	1	Hea
Kiudoptika	Kõrge	Keerukas	2000	60	Täielik
Raadiokanal, väike	Mõõdukas	Lihtne	1...10	0,025	Halb
Raadiokanal, suur	Mõõdukas	Keerukas	1...10	100	Halb
GSM	Mõõdukas	Mõõdukas	2...6	25	Hea
Mikrolainekanal	Mõõdukas	Mõõdukas	1...10	100	Halb
Satelliitside	Kõrge	Keeruline	1..10	Glob.	Halb
Infrapunane	Madal	Lihtne	1...16	0,1	Hea

Sidevõrk tegeleb analoog- ja digitaalinfo ülekandmisega. Sideliinidele, modemitele ja multiplexeritele lisaks sisaldab sidevõrk kanali teenindamise seadmeid, mis valmistavad elektriimpulsse ette võrku saatmiseks, hoolitsevad selle eest, et signaalil oleks õige tugevus, formaat ja madal müranivoo. Sidevõrgu eriliigiks on andmesidevõrk (andmevõrk), mis edastab ainult digitaalinfot. Andmevõrk koosneb sõlmedest (jaamadest), mis on omavahel ühendatud side-

liinide abil. Kui arvuti asub vähemalt kahes sõlmes, siis nimetatakse seda arvutivõrguks. Andmeside võib toimuda järgmiste võrkude kaudu:

- avalikud ja eraõiguslikud telefonivõrgud
- andmesidevõrgud, mis võimaldavad ainult digitaalsete edastamist
- integraalvõrgud, mis võimaldavad käsitleda nii analoog- kui digitaalsete ja mida võib realiseerida tavalise telefonivõrgu baasil
- kaabeltelevisioonivõrgud.

Kokkuvõtvalt on juhtmega ja juhtmeta andmesideühenduste võrdlus esitatud vastavalt tabelites 1.2 ja 1.3.

Tabel 1.2. Juhtmega andmesideühenduste võrdlus.[4]

Family	Standards	Data rate	Coverage	Scope	Advantages	Disadvantages
PLC	<ul style="list-style-type: none"> NB-PLC: ISO/IEC 14908-3 (LonWorks), ISO/IEC 14543-3-5 (KNX), CEA-600.31 (CEBus), IEC 61334-3-1, IEC 61334-5 (FSK and Spread-FSK) BB-PLC: TIA-1113 (HomePlug 1.0), IEEE 1901, ITU-T G.hn (G.9960/G.9961) non-SDO NB-PLC: Insteon, X10, G3-PLC, PRIME non-SDO BB-PLC: HomePlug AV/Extended, HomePlug Green PHY, HD-PLC 	<ul style="list-style-type: none"> NB-PLC: 1–10 Kbps for low data-rate PHYs, 10–500 Kbps for high data-rate PHYs BB-PLC: 1–10 Mbps (up to 200 Mbps on very short distance) 	<ul style="list-style-type: none"> NB-PLC: 150 km or more BB-PLC: ~1.5 km 	<ul style="list-style-type: none"> NB-PLC: large-scale AMI, FAN, WAN BB-PLC: HAN/small-scale AMI 	<ul style="list-style-type: none"> Large-scale communication infrastructure is already established Physical separation from other telecommunications networks Low operational costs 	<ul style="list-style-type: none"> Multiple non-interoperable technologies High signal attenuation and channel distortion Disruptive interference from electric appliances and other electromagnetic sources Difficult to support high bit rates Routing is complex Standards evolve relatively slowly
Optical Fibers	<ul style="list-style-type: none"> AON: IEEE 802.3ah PON: ITU-T G.983 (BPON), ITU-T G.984 (GPON), IEEE 1901, IEEE 802.3ah (EPON) 	<ul style="list-style-type: none"> IEEE 802.3ah (AON): 100 Mbps up/down BPON: 155–622 Mbps up/down GPON: 155–248 Mbps up, 1.244–2.448 Gbps down EPON: 1 Gbps up/down 	<ul style="list-style-type: none"> IEEE 802.3ah (AON): up to 10 km BPON, GPON: up to 20–60 km EPON: up to 10–20 km 	<ul style="list-style-type: none"> WAN AMI (with FTTH systems) 	<ul style="list-style-type: none"> Long-distance communications (much longer than DSL) Ultra-high bandwidth (suitable for supporting multimedia services to residential customers) Robustness against electromagnetic and radio interference 	<ul style="list-style-type: none"> High network deployment costs (lower with PONs than ADNs) High cost of terminal equipment Difficult to upgrade Not suitable for metering applications
DSL	<ul style="list-style-type: none"> ITU G.991.1 (HDSL) ITU G.992.1 (ADSL), ITU G.992.3 (ADSL2), ITU G.992.5 (ADSL2+) ITU G.993.1 (VDSL), ITU G.993.1 (VDSL2) 	<ul style="list-style-type: none"> ADSL: 8 Mbps down and 1.3 Mbps up ADSL2: 12 Mbps down and up to 3.5 Mbps up ADSL2+: 24 Mbps down and up to 3.3 Mbps up VDSL: 52–85 Mbps down and 16–85 Mbps up VDSL2: up to 200 Mbps down/up 	<ul style="list-style-type: none"> ADSL: up to 4 km ADSL2: up to 7 km ADSL2+: up to 1.2 km VDSL2: 300 m (maximum rate) – 1 km (50 Mbps) 	<ul style="list-style-type: none"> AMI FAN 	<ul style="list-style-type: none"> Large-scale communication infrastructure is already established Most commonly deployed broadband technology for residential customers 	<ul style="list-style-type: none"> Tele operators can charge utilities high prices to use their networks Not suitable for network backhaul (long distances result into data rate degradation)

Tabel 1.3. Juhtmeta andmesideühenduste võrdlus. [4]

Family	Standards	Data rate	Coverage	Scope	Advantages	Disadvantages
WPAN	<ul style="list-style-type: none"> IEEE 802.15.4 Non-SDO: ZigBee, WirelessHART, ISA 100.11a (all based on IEEE 802.15.4) 	<ul style="list-style-type: none"> IEEE 802.15.4: 256 Kbps 	<ul style="list-style-type: none"> IEEE 802.15.4: Between 10 and 75 m 	<ul style="list-style-type: none"> V2G HAN AMI 	<ul style="list-style-type: none"> Very low power consumption Cheap equipment Suitable for devices with low memory and computing power New standards provide full interoperability with IPv6-based networks 	<ul style="list-style-type: none"> Low bandwidth Do not scale to large networks
WiFi	<ul style="list-style-type: none"> IEEE 802.11e (QoS enhancements) IEEE 802.11n (ultra-high network throughput) IEEE 802.11s (mesh networking) IEEE 802.11p (WAVE - wireless access in vehicular environments) 	<ul style="list-style-type: none"> IEEE 802.11e/s: up to 54 Mbps IEEE 802.11n: up to 600 Mbps 	<ul style="list-style-type: none"> IEEE 802.11e/s/n: up to 300 m (outdoors) IEEE 802.11p: up to 1 Km 	<ul style="list-style-type: none"> V2G HAN AMI 	<ul style="list-style-type: none"> Low-cost network deployments (unlicensed spectrum) Cheap equipment High flexibility, suitable for different use cases 	<ul style="list-style-type: none"> High interference since it operates in a very crowded unlicensed spectrum power consumption might be too high for many smart grid devices Simple QoS support (basically traffic prioritization)
WiMAX	<ul style="list-style-type: none"> IEEE 802.16 (fixed and mobile broadband wireless access) IEEE 802.16j (multihop relay) IEEE 802.16m (advanced air interface) 	<ul style="list-style-type: none"> 802.16: 128 Mbps down and 28 Mbps up 802.16m: 100 Mbps for mobile users, 1 Gbps for fixed users 	<ul style="list-style-type: none"> IEEE 802.16: 0–10 km IEEE 802.16m: 0–5 (optimum), 5–30 (acceptable), 30–100 (reduced performance) km 	<ul style="list-style-type: none"> AMI FAN WAN 	<ul style="list-style-type: none"> Suitable for thousands of simultaneous users Longer distances than WiFi A connection-oriented control of the channel bandwidth More sophisticated QoS mechanisms than 802.11e 	<ul style="list-style-type: none"> Network management is complex High cost of terminal equipment Use of licensed spectrum
3G/4G	<ul style="list-style-type: none"> 3G: UMTS (HSPA, HSPA+) 4G: LTE, LTE-Advanced 	<ul style="list-style-type: none"> HSPA: 14.4 Mbps down and 5.75 Mbps up HSPA+: 84 Mbps down and 22 Mbps up LTE: 326 Mbps down and 86 Mbps up LTE-Advanced: 1 Gbps down and 500 Mbps up 	<ul style="list-style-type: none"> HSPA: 0–5 km LTE-Advanced: 0–5 (optimum), 5–30 (acceptable), 30–100 (reduced performance) km 	<ul style="list-style-type: none"> V2G HAN AMI 	<ul style="list-style-type: none"> Able to support tens of millions of devices Low power consumption of terminal equipment Cellular operators are launching smart grid-specific service solutions High flexibility, suitable for different use cases Use of licensed spectrum reduces interference Open industry standards 	<ul style="list-style-type: none"> Cellular operators can charge utilities high prices to use their networks Use of licensed spectrum increases cost Difficult to ensure delay
Satellite	<ul style="list-style-type: none"> LEO: Iridium, Globalstar, MEO: New ICO CEO: Inmarsat, BGAN, Swift, MPDS 	<ul style="list-style-type: none"> Iridium: 2.4 to 28 Kbps Inmarsat-B: 9.6 up to 128 Kbps BGAN: 384 up to 450 Kbps 	<ul style="list-style-type: none"> Depend on number of satellites and their beams 	<ul style="list-style-type: none"> AMI WAN 	<ul style="list-style-type: none"> Long distance Highly reliable 	<ul style="list-style-type: none"> High cost of terminal equipment High latency

1.3 Sideprotokollid

Andmeside esmaülesanne on ühendada omavahel kaks või enam informatsiooni vahetavat seadet. Kuna seadmed peavad oskama üksteisega suhelda, nõuab andmevahetus kindlate reeglite, protokollistiku täitmist. Kahe sama tüüpi arvuti ühendamisel on sideprotokoll suhteliselt lihtne. Keerukaks muutub sideprotokoll eri tüüpi seadmete kokkuühendamisel ja andmeedastusel füüsiliselt erisuguste sidekanalite kaudu. Probleemid seonduvad avatud süsteemidega, millega võib liita põhimõtteliselt mis tahes tootja seadmeid.

Digitaalsete sõnumite edastamine seadmete vahel toimub kasutades varasemalt kokku lepitud võrku ja protokollid. Protokoll on reeglite kogum, mida arvutid kasutavad andmete võrgu kaudu saatmiseks ja vastuvõtmiseks. Protokoll määrab kasutatava veaavastuskoodi, andmetihendusmeetodi ning selle, kuidas saatev seade annab teada, et sõnumi edastamine on lõpetatud ning kuidas vastuvõttev seade annab teada, et sõnum on edukalt vastu võetud. [3] Protokoll hõlmab sõnumivorminguid, teenuseid, protseduure, aga ka adresseerimise ja nimeandmise kokkuleppeid.

Võimaldamaks eri tootjate seadmete ja süsteemide vahelist ühendust tuleb määrata kasutatavate protokollide paketid, et [4]:

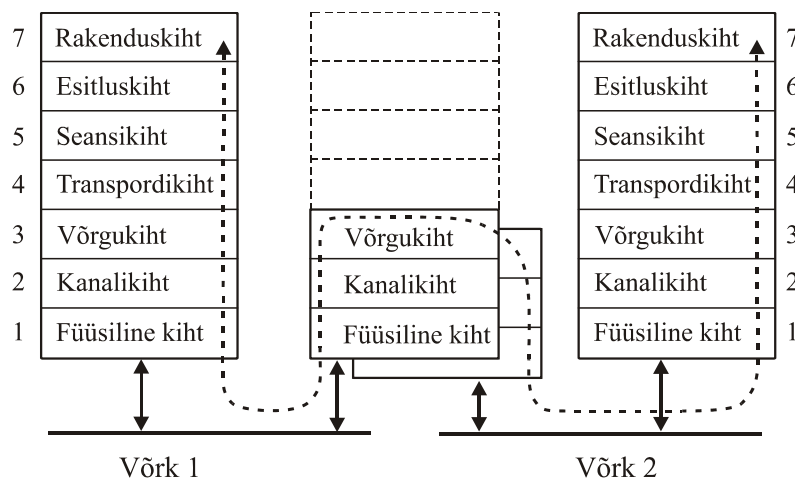
- siduda sõlme identiteete võrguseadmetega (nimetamise ja adresseerimise ülesanded);
- kehtestada sõlmede vahelised teekonnad (marsruutimise ülesanne);
- määratleda sõnumivormingud ja reeglid sõnumite vahetamiseks (transpordi ülesande);
- toetada täiendavaid võrguteenuseid nagu andme edastus (broadcast), multiedastus (multicast) ja teenuse kvaliteet (QoS - Quality of Service) ja turvalisus (security).

Pakettvõrkudes liikluse korralduse (traffic engineering) mõiste “garanteeritud teenuse kvaliteet” (QoS, Quality of Service) tähendab tõenäosuslikku hinnangut, et sidevõrk jälgib liikluslepet. Paljudel juhtudel kasutatakse QoS tõenäosusena, et pakett läbib võrku saatjast vastuvõtjani oma ettemääratud ajavahemiku jooksul [5].

Andmeside arenedes muutus infovahetus komplitseeritumaks ja suhtlusviisid mitmekesisemaks ning tekkis olukord, kus eri firmade seadmetega oli raske või lausa võimatu infot vahetada. Ülesande hõlbustamiseks töötas ISO (*International Organisation for Standardization*) 80. aastatel välja avatud süsteemide ühendamise seitsmekihilise arhitektuuri, mida tänapäeval tuntakse OSI-mudelina (*Open System Interconnection*), kus keeruka sidevõrgu funktsioonid eraldatakse seitsmeks protokollikihtiks (joonis 1.2):

- füüsiline kiht (*physical layer*) määratleb ülekande elektriliselt ja mehaaniliselt (pinged, voolu tugevused, taktsagedus, pordid, juhtmed, järgurid jms)
- kanalikiht (*data link layer*) formeerib kaadrid ja edastamisteenused võrgukihile, teeb tsükkelkontrolli ja edastusteenuseid järgmisele kihile
- võrgukiht (*network layer*) korraldab võrkudevahelise loogilise sideme ja koondab kaadrid pakettideks (datagrammideks) – andmeid ja piisavat marsruutimisteavet sisaldavaiks iseisvaiks edastamisüksusteks
- transpordikiht (*transport layer*) koondab paketid (datagrammid) segmentideks ja edastab need järgmisele tasemele, hoolitsedes töökindluse ja andmete õigsuse eest
- seansikiht (*session layer*) loob saatja ja vastuvõtja vahel ühenduse, kannab üle andmed, korrigeerib vead ja seansi lõppedes vabastab ühenduse
- esitluskiht (*presentation layer*) teisendab andmed rakendustele mõistetavasse formaati, pakib suured andmehulgad ja vajadusel ka šifreerib need
- rakenduskiht (*application layer*) kasutab eriprogramme, et pakkuda failihalduse, trükkimise, teadete edastamise, andmebaaside haldamise ja muid teenuseid.

Oluline on teada, et OSI mudel on ainult üks võimalus vaadata arvutivõrgu toimimise peale, reaalses elus ei ole meil tihti võimalik öelda millisel OSI tasemel konkreetne seade või protokoll töötab. Küll aga jälgitakse reaalses elus üldist, OSI mudelis esitatud ideoloogiat. Praktilises töös ei kasutata OSI terminoloogiat ning mainitud kihtide täpse rolli teadmine ei aita efektiivselt arvutivõrkusid planeerida, ehitada ega hallata [5].



Joonis 1.2. Avatud süsteemide OSI mudel.

Protokollikihist olenevalt on andmed koondatud järgmisteks üksusteks:

- füüsiline kiht – bitt (bitivoog)
- kanalikiht – kaader (*frame*)

- võrgukiht – pakett, datagramm
- transpordikiht – segment, andmevoog
- kõrgemad kihid – andmed (*data*).

Igas kihis lisatakse protokollispetsiifilised metaandmed (üksuse päis ja võimalikult ka saba).

Iga protokoll sisaldab reegleid ja protseduure, mis võrgutöös on vajalikud kindla ülesande täitmiseks. Põhimõtteks on, et iga kiht täidab selgelt määratletud tegevusi, mis kasutavad ära madalama kihi teenused ja pakuvad omakorda teenuseid kõrgemale kihile. IP (*Internet Protocol*) võrgus olevat seadet, millel on unikaalne IP-aadress, nimetatakse hostiks. Füüsiline adresseerimine (*Media Access Control, MAC*) toimub teises kihis, loogiline kolmandas. Andmete tegelikule ülekandele vastavad kihid 1...3. Kihis 4 (transpordikiht) kogutakse ja kontrollitakse sõnumit, mis üldjuhul koosneb mitmest paketist. Kõrgemates kihtides sõnumit enam ühest sõlmest teise ei edastata. Kasutusel on ka lihtsustatud *OSI*-mudel, kus kihid 3...6 puuduvad. Nendele vastavad tegevused täidetakse seitsmendas kihis. Igale protokollikihtile vastab harilikult üks kindel protokoll, kuid on ka selliseid protokolle, mis vastavad korraga mitmele kihile. Protokolle, mis moodustavad ühtse terviku, nimetatakse protokollistikuks.

TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) on Interneti aluseks. On loodud USA kaitseministeeriumis ja standarditud 1981. aastal. *TCP/IP*-mudel on võrreldes *OSI*-mudeliga lihtsam (joonis 1.3). See protokoll defineerib viisi kuidas grupp eraldiseisvaid võrke saavad töötada üksteisega, et luua globaalne võrk ehk Internet [3].

TCP/IP mudel	OSI mudel
Rakenduskiht	Rakenduskiht
	Esitluskiht
	Seansikiht
Transpordikiht	Transpordikiht
Internet	Võrgukiht
Võrgu ligipääs	Füüsiline kiht

Joonis 1.3. *TCP/IP- ja OSI-mudelite võrdlus.*

IP-protokoll pole usaldusväärne. Väljasaadetud paketi edasise käekäigu kohta ei ole saatjal mingit kontrolli. Saatja ei tea, kas teine pool on üldse kättesaadav. *IP*-aadress on 32-bitine number, mis on jaotatud neljaks oktetiks. Aadressi kuuluvad võrgu- ja hostiosad.

Esimene laialtkasutatav versioon IP-st oli IPv4 (*Internet Protocol Version 4*), mille IP aadressi pikkuseks oli 32 bitti ehk 4 baiti. Uuem IP protokoll versioon IPv6 omab 128 bitist IP aadressi ning see loodi asendamaks IPv4, kuna IPv4 korral ei jätku unikaalseid IP aadresse

kiire võrguseadmete arvu kasvu tõttu. IP on kasutusel ka kohtvõrkudes, mitte üksnes Internetis [3].

Internetiprotokolli funktsioon või eesmärk on liigutada andmepakette läbi vastastikuselt seotud võrkude komplekti. Eesmärgi täitmiseks liigutatakse pakette ühest internetimoodulist teise kuni sihtkohta jõudmiseni. Internetimoodulid asuvad hostides ning lüüsid interneti süsteemis. Paketid saadetakse ühest internetimoodulist teise läbi individuaalsete võrkude IP aadressi alusel. Seetõttu on internetiprotokolli aadress (IP aadress) tähtis internetiprotokolli mehhanism, mille abil pakette edastada. Andmete edastamisel ühest internetimoodulist teise võib ette tulla olukord, kus andmepaketid on suuremad, kui mõne võrgu maksimaalne paketsuuruse läbilaskevõime. Selleks on internetiprotokollil mehhanism, mis tükeldab pakette, et need suudetaks siiski kohale toimetada [3].

Adresseerimise raames eraldatakse nimesid, aadresse ja teekondi. Nimi näitab, mida otsime. Aadress näitab, kus see otsitav info asub. Teekond näitab, kuidas sinna asukohta jõuda. Internetiprotokoll tegeleb peamiselt aadressidega. Rakenduste protokollide ülesandeks on vastandada nimed aadressidele. Internetimoodulid seavad kohtvõrkude aadressid interneti aadressidele. Lüüside protseduuride ülesandeks on vastandada kohtvõrkude aadressid teekondadeks. Internetiprotokolli aadressidel on kindel pikkus – neli oktetti ehk 32 bitti (vt IPv4). IP aadress algab võrgu numbriga, sellele järgneb kohtvõrgus talle vastav aadress. Eristatakse mitut erinevat internetiprotokolli formaati või klassi – A, B, C, D ja E, kus klass A on kujuga 255.0.0.0, klass B kujuga 255.255.0.0, klass C kujuga 255.255.255.0, klass D vahemikus 224.0.0.0–239.255.255.255 ning klass E on mõeldud eksperimentaalseks kasutamiseks [3].

Internetiprotokoll ei ole loodud täielikult töökindlana. Interneti kontrollsõnumiprotokoll on kasutusel, et saada tagasisidet hostide vahelise suhtluse kohta, mitte eesmärgiga muuta internetiprotokoll töökindlaks. Andmepakettide kohalejõudmine ning kontrollsõnumite tagasisõudmine pole siiski garanteeritud. Võib juhtuda, et andmepakett ei jõua sihtkohta kohale ning sellest ei anta kuidagi ka saatjale märku. Kui on vaja töökindlat suhtlust (andmepakettide/sõnumite jne saatmist), siis tuleb internetiprotokolli kasutataval kõrgema kihi protokollidel kasutada enda töökindlusi suurendavaid protseduure [3].

Interneti kontrollsõnumiprotokoll saadab tõrketeate ainult juhul, kui tegemist on andmepakettidega seonduvaga. Teateid interneti kontrollsõnumiprotokolli kontrollsõnumite kohta ei saadeta, näiteks juhul, kui kontrollsõnumile ei tule vastust.

Internetis ning teistes võrkudes kasutatakse internetiprotokolli koos paljude teiste protokollidega, muuhulgas TCP, UDP ning ICMP protokollidega.

TCP/IP (*Transmission Control Protocol / Internet Protocol*) on kihiline protokollide kompleks, mis töötati välja ARPANet-i jaoks ning levis sealt edasi ka teistesse võrgutüüpidesse, kaasaarvatud Ethernet, mis on tänapäeval üks levinuimaid. TCP/IP protokoll nimes on küll ainult kaks protokollid, kuid tegelikult koosneb ta neljast protokollist: TCP, IP, UDP ja ICMP.

TCP (*Transmission Control Protocol*) toimib transpordikihis. TCP ühendused on mõeldud virtuaalse ja usaldusväärse täisdupleksühenduse loomiseks kahe hosti vahel. TCP protokoll andmeühikuks on segment. TCP hoolitseb selle eest, et kasutaja saaks saata korraga palju andmeid. Selleks tuleb andmed segmenteerida väiksemateks osadeks. Kõik segmendid varustatakse järjekorranumbriga, mille abil saab vastuvõtja segmendid õiges järjekorras kokku panna. Port on transpordikihi protokoll objekti; iga rakendusega on seotud ühene porti number. TCP tagab usaldusväärse ühenduskanali. Kättesaamise kontrollimiseks peab vastuvõtja kinnitama, et on segmendi kätte saanud. Kui saatja ei saa määratud aja jooksul (tavaliselt 3 sekundit) kinnitust, siis loeb ta segmendi kaduma läinuks ja saadab selle uuesti.

Kuna ühes masinas on tavaliselt mitu programmi, siis on vaja teada, missugune programm peaks saama võrgust saadud andmed. Selleks kasutatakse mõistet port – number, mis määrab, missugusele programmile andmed kuuluvad. Globaalselt on lepitud kokku programmid portinumbriga 1...1023.

Siiski võib ajakriitilise andmeside edastuses TCP protokoll jääda ebapiisavaks seda eriti andmetega, mis on oma olemuselt perioodilised (näiteks PMU mõõtmistulemused). Enamik tavakasutuses edastatavatest andesidepakettidest on siiski väikesed ning neid edastatakse harva. Ka sellistel juhtudel võib TCP ülekoormusel pakettide kontroll olla ebaefektiivne ja see võib põhjustada kasutu pakettide ümbersuunamise või edastamises viivitusi [4].

Teine transpordikihi protokoll Interneti protokollistikus on UDP (*User Datagram Protocol*). UDP on lihtne protokoll, tema töö sarnaneb paljuski TCP-ga, ehkki ei paku nii keerukat viigade vältimist ja parandust, kuid selle eest võimaldab võimsamat andmevahetust kahe masina vahel. Samas ei taga UDP, et info sihtpunkti jõuab. Seetõttu on UDP kiirem. Seda kasutatakse näiteks multimeedia edastamisel ning mujal, kus tähtis on andmeside kiirus ja vähemtähtis selle kvaliteet (pakettide kadumisel neid uuesti ei saadeta).

UDP võimaldab otspunktide (defineeritud IP aadressi järgi) vahele olekuta ühendusi luua ehk UDP-l ei ole erinevalt TCP-st selgelt eristatavaid olekuid "suletud", "ühendamisel", "ühenda-

tud". Kuna ühenduse olekut ei kontrollita, peab UDP kasutama *best-effort* põhimõtet ehk koostatud pakett saadetakse välja ja loodetakse, et see jõuab kohale. Kui pakett mõnel põhjusel kohale ei jõua, ei ole saatjal võimalik seda protokollil tasemel tuvastada ja seetõttu ei toimu ka automaatset paketi uuestisaatmist.

UDP ei kontrolli paketi kohale jõudmist. Samuti ei nummerda UDP saadetud pakette, mis tähendab, et paketid võivad sihtpunkti jõuda suvalises järjekorras ja neid ei ole võimalik hiljem protokollil tasemel järjestada. Samuti ei ole võimalik tuvastada olukorda, kui mingist paketist jõuab sihtpunkti mitu koopiat. UDP ei tuvasta ka ummikuid ega piira sellest tulenevalt saadetavate andmete mahtu (erinevalt TCP-st).

ICMP - *Internet Control Message Protocol* – IP protokollil laiendus, mille abil on võimalik mitmed interneti teenused seal hulgas ping (teenus, mille abil testitakse ühenduse olemasolu kahe masina vahel). ICMP võimaldab saata pakette, mis sisaldavad vea-, kontrolli- ja info-teateid.

Pidevas ühenduses toimivad andmesideprotokollid peavad tagama andmete töökindla edastamise ning seal on TCP protokoll teatud matus liikumiskiirust tõkestav. Kui ülekandes on vigu, siis TCP protokoll üritab andmeid uuesti saata, mis toob kaasa viivitusi ning edastatavad andmed ei ole enam reaalajas. Seevastu UDP protokollis ei ole viivitusi (kuna andmeid uuesti ei saadeta ja ümber ei suunata) ning UDP protokollil kasutamine laimõõtmistes eeldusel, et kasutusel on häiringutevaba privaatne või erivõrk ei põhjusta andmete kadumist. Juhul, kui andmete kadumine on lubatu piires, on võimalik tarkvaraliselt kohepeal andmeid parendada. Seega on laimõõtmistes teatud eelised UDP protokollil TCP protokollil ees [3].

UDP ei paku saadetud andmetele konfidentsiaalsust, terviklikkust. UDP protokoll ei krüpteeri andmeid ehk paketi sisu on kõigile kergelt loetav. UDP ei taga, et algpunkti ja sihtpunkti vahel andmeid sihiteadlikult ei muudeta (vahendajarünne). Küll aga teeb UDP veakontrolli (*checksum*), et tuvastada transpordi käigus tekkinud vigu.

UDP ühenduse üles seadmine on lihtne ja võtab vähe ressursse. Ühenduse loomiseks on vaja teada ainult sihtpunkti IP aadressi ja porti numbrit. UDP andmeside on ebakindel, aga kiire, sest sihtpunkt ei pea saatma kinnitusi, et ta on paketid kätte saanud. UDP lihtsuse tõttu on tema päis väga lihtne ja väikese mahuga (8 baiti). Ühte UDP paketti mahub maksimaalselt natuke alla 64 kB andmeid (65 507 baiti IPv4ga ja 65 527 baiti IPv6ga).

Levinumad UDP kasutusala on need, kus kõigi pakettide kohale jõudmine ei ole oluline, andmeside madal latentsus (sihtpunkti jõudmise aeg) on tähtis või transpordikihist kõrgemal

olev protokoll korraldab ise pakettide uuestisaatmise ja järjestamise. Levinud kasutusalaadeks on VPN tunnelid ja heli/video edastamine.

1.4 Laiseirerakenduste andmeedastus

PMU mõõtmised on rangelt viivitustundlikud, kuna pidevalt mõõdetaksi uusi tulemusi. Kui mõõtmistulemusi ei edastada õigeaegselt ehk enne uute andmiste saamist, siis andmete kasutatavus väheneb oluliselt. Samuti eeldab andmete pidev ülekanne kindlat andmesidet ja andmeside kõrget kvaliteeti. PMU-d mõõdavad sünkroonselt ja seega edastavad nad ka andmeid sünkroonselt. Võib tekkida oht, et kui kõiki andmeid edastada korraga kasvab side maht ootamatult, mis võib tõsiselt halvendada võrgu jõudlust. Seega tuleks PMU andmeedastus planeerida nii, et nii võrgu koormus kui ka rakenduse viivitus jääksid teatud tasemele [6].

PMU vahelise andmeühenduse kirjeldab IEEE standard C37.118-2005 [7] ning seal määratakse neli sõnumi tüüpi: andmed (*data*), vorm (*configuration*), päis (*header*) ja käsk (*command*). Esimesed kolm sõnumit on suunaga PMU/PDC-st ja on seotud mõõtmistega ning viimane sõnum „käsk“ on suunaga PMU/PDC-sse.

- Sõnum *data* on mõõtmisandmed, mis on PMU mõõdetud.
- Sõnum *configuration* on masinloetav sõnum, mis kirjeldab andmete tüübid, kalibreerimisväärtused ja muud metaandmed, mida PMU/PDC saadab.
- Sõnum *header* on inimloetav sõnum, millega kasutaja ise kirjeldab ära andmed, mida PMU/PDC ise saadab.
- Sõnum *command* on masinloetav kood, mis saadetakse PMU/PDCle nende kontrollimiseks või seadistamiseks.

PMU või PDC võib välja saata mitmeid erinevaid andmevooge, milles igäühes võib olla erinev sisu, kvaliteet (maht), formaat jms. Igal andmevool on oma nn. kood (IDCODE), mille abil vajaliku seadistust tuvastada.

Kasutatava andmeside mahu näitena võib tuua allika [6], kus autorid eeldasid, et iga PMU sõnum sisaldab nelja mõõtmistulemust (kolme faasi pinget ja ühte voolu) ning lisaks infot kahe analoogsignaali ja ühe digitaalsignaali kohta. Võttes arvesse andmesideprotokollide enda mahtu (vastavalt IP 20 baiti ja UDP 8 baiti) saame kogu protokolliaandmiku (PDU - *protocol data unit*) mahuks 76 baiti. Kogu PMU andmesidemaht sõltub aga ennekõike andmeedastuse tihedusest ja edastatavate andmete hulgast.

Andmesidekiirus sõltub andmesidekanali kiirusest, saadetava sõnumi suurusest ja seadmetes ja ülekandevõrgus olevast latentsusest. Laimdõtmistel on kaheks suurimaks andmesidet mõjutavaks teguriks süsteemi latentsus ja andmesidekanali kiirus.

Latentsus on ajavahe, mis tekib paketi saatja poolt teele panemise ja vastuvõtja poolt vastuvõtmise vahel. Lokaalvõrgu puhul on see reeglina niivõrd väike, et temaga mingeid probleeme ei ole (< 10 ms). Kaugvõrgu puhul tekib viivis pakettide kandmisest pikkade vahe- maade taha ja sellest, et tihti on kaugvõrgus kahe otspunkti vahel mitmeid vahejaamu, mis paketti töötlevad. Iga selline töötlemine võtab oma aja ning lõpptulemusena võib kaugvõr- kude puhul latentsus olla 100 – 500 ms vahel. Latentsuse tõttu võib tekkida olukord, kus ra- kendus, mis vahetab palju väikeseid pakette, ei suuda üle kaugvõrgu normaalselt töötada, ku- na lõpptulemusena kasvab ooteaeg liiga suureks [1].

Ülekandekiirus on andmete ülekandmise kiirus. Kaugvõrkude töökiirused on tavaliselt kordi aeglasemad kui lokaalvõrgus. See tähendab, et paljud rakendused, mis lokaalvõrgus laitmatult töötavad, ei ole suutelised efektiivselt töötama kaugvõrgu puhul. Enamkasutatava Cat5e võr- gujuhtme andmeside kiirus on kuni 1000 Mbit/s. Laimdõtmisteks vajalik andmesidekiirus peab olema suurem võrreldes seda SCADA tööks vajaliku kiirusega. PMU-de soovitatav latent- sus peab jääma vahemiku 20 ja 200 ms sõltuvalt kasutusvaldkonnast, samas kui vajalik üle- kandekiirus algab mõnesajast kbps ja sõltub PMU-de arvust, saadetavate sõnumite pikkusest, sõnumite arvust ja võrgu sagedusest. Võrdluseks, siis SCADA ülekandekiirus võib olla suu- rusjärgus 10...30 kbps ja latentsus isegi kuni 2...4 sekundit. Täpsemalt on andmeside kiirused ja latentsus erinevatel rakendustel toodud tabelis 1.4 [2] ja tabelis 1.5 [10].

Tabel 1.4. Nõuded andmeedastusele erinevate rakenduste korral [2].

Application	Network Requirements				
	Bandwidth	Latency	Reliability	Security	Backup Power
AMI	10-100 kbps/node, 500 kbps for backhaul	2-15 s	99-99.99%	High	Not necessary
Demand response	14-100 kbps per node/device	500 ms-several minutes	99-99.99%	High	Not necessary
Wide area situational awareness	600-1500 kbps	20-200 ms	99.999-99.9999%	High	24 h supply
Distribution energy resources and storage	9.6-56 kbps	20-15 ms	99-99.99%	High	1 h
Electric transportation	9.6-56 kbps, 100 kbps is a good target	2-5 min	99-99.99%	Relatively high	Not necessary
Distribution grid management	9.6-100 kbps	100 ms-2 s	99-99.999%	High	24-72 h

Standardis C37.118.2 [7] on hinnatud ülekandekiiruste vajadusi erinevate PMU seadistuste korral ning saadud tulemused on kokkuvõtlikult kujutatud tabelis 1.6. Täpsemalt PMU-de ja nende andmesidest saab lugeda vastavatest IEEE standarditest seerias C37.118.1 ja C37.118.2.

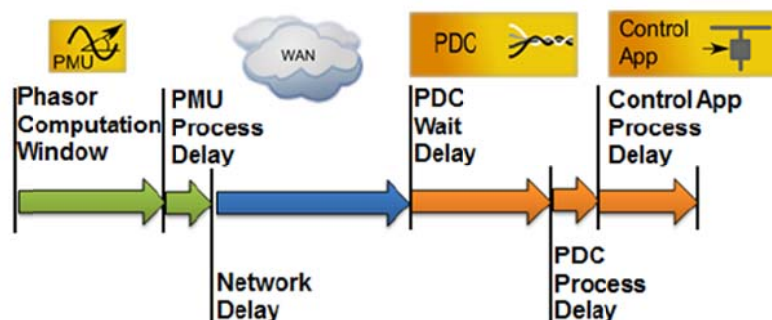
Tabel 1.5. Nõuded andmeedastusele ja latentsusele. [10]

Applications	Transmission rate (frames/s)	Latency (s)
Frequency monitoring	25,50	≤1
Reactant power & voltage	25,50	≤1
State estimation	25,50	1
System identification	25,50	1
Low frequency oscillation	25,50	≤1
Stability predict and monitor	25,50,100	<0.1

Tabel 1.6. Ülekandekiiruse vajadus erinevate PMU seadistuste korral [7].

Transmission rate in bits per second (bps) for example messages using UDP/IP over Ethernet							
PMU reporting rate (data frames/second)	10	12	15	25	30	50	60
Message content: 2 phasors, all quantities integer	6 720	8 064	10 080	16 800	20 160	33 600	40 320
Message content: 2 phasors, all quantities floating point	7 680	9 216	11 520	19 200	23 040	38 400	46 080
Message content: 12 phasors, all integer	9 920	11 904	14 880	24 800	29 760	49 600	59 520
Message content: 12 phasors, 2 analog, 2 digital, all integer	10 560	12 762	15 840	26 400	31 680	52 800	63 360

Laimdõtmistel põhinevate juhtumise- ja kaitsefunktsioonide välja töötamisel on tarvis arvestada viiteid nii PMU mõõtmiste teostamisel, andmete ülekandmisel kui ka andmete töötlemisel. Selle protsessi näitlikustamiseks on toodud joonis 1.4. Seega on laiseire rakenduste plaanimisel ja kavandamisel oluline koht nii mõõteseadme kui ka andmete ülekandmise keskkonna valik. Täiendavalt on oluline määratleda viited ka kontsentraatoris ja seal tehtavatel arvutustel. Erinevate osade võimalike viidete suurused on kokkuvõtlikult esitatud tabelis 1.7. Kokkuvõtlikult saab öelda, et oluline on arvestada kõikide ahela komponentide vigade ja viidetega ning laiseirerakenduste korrektseks töötamiseks peavad koostatud lahendused olema võimalikul töökindlad ning samuti olema võimelised taluma pikemaid viiteid ja andmete osalist puudumist.



Joonis 1.4. Viited laiseirerakenduste kasutamisel. [11]

Tabel 1.7. Kokkuvõte võimalikest viidetest ning nende tüüpilistest vahemikest.[7]

Cause of delay	Typical range of delay
Sampling window (delay ½ of window)	17 ms to 100 ms
Measurement filtering	8 ms to 100 ms
PMU processing	0.005 ms to 30 ms
PDC processing & alignment	2 ms to 2+ s
Serializing output	0.05 ms to 20 ms
Communication system I/O	0.05 ms to 30 ms
Communication distance	3.4 µs/km to 6 µs/km
Communication system buffering and error correction	0.05 ms to 8 s
Application input	0.05 ms to 5 ms

1.5 Kokkuvõte

Tänapäeva elektrisüsteemi juhtimine on otseselt seotud arvutustehnika ja selle arengutega. Sellest tulenevalt on oluline teada andmeedastuseks kasutatavate keskkondade omadusi ja nende rakendusvaldkondi. Arvestades laimõõtmistel põhinevate rakenduste võimalikku tähtsust, siis on oluline nende plaanimisel ja rakendamisel arvestada ja teada ühe võimaliku kitsaskoha põhimõtteid ning võimalusi.

Käesolevas peatükis käsitleti erinevaid andmete edastamisega seotud komponente. Vaadeldi andmesidevõrke ja nende omadusi ning sideprotokolle. Rõhuasetus peatükis on olnud laimõõtesüsteemi vahendusel edastavate andmete ülekandmise teostamiseks olulistele nõuetele nii andmeedastuse kui ka latentsuse valdkonnas. Täpsemalt peatuti laiseirerakendustel arvestades infoedastusega seotud küsimusi. Olulise tähtsusega on siinkohal andmeedastuse kanalid ja viited, mis tekivad alates mõõteandmete mõõtmisest PMU-dega, nende ülekandmisest kontsentraatoritesse, töötlemisest kontsentraatoris, edastamisest juhitavatele seadmetele ning seadmete enda talitlemisest.

Kokkuvõtvalt saab öelda, et tänapäeva fiiberoptilised kanalid on sobilikud laiseirerakenduste kasutamiseks, kuid siiski tuleb juhtimisalgoritmide koostamisel arvestada andmete hilistumist ja osalist puudumist.

1.6 Kirjandus

[1] Taavi Tamberg loengukonspekt.

http://pc.parnu.ee/~ttamb/ikt/mis/mis2003/ati_syshald/Arvutis%FCsteemi%20objektid%20-%20arvutivork.htm (30.12.2014)

- [2] J. Bhatt, V. Shah, and O. Jani. An instrumentation engineer's review on smart grid: Critical applications and parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 40, December 2014, pp 1217-1239.
- [3] Protokoll (Andmeside), Wikipedia.
http://et.wikipedia.org/wiki/Protokoll_%28andmeside%29 (30.12.2014)
- [4] E. Ancillotti, R. Bruno, and M. Conti. The role of communication systems in smart grids: Architectures, technical solutions and research challenges. *Computer Communications*, vol. 36, issue 17-18, Nov-Dec 2013, pp. 1665-1697.
- [5] A. Ots. Sidevõrgud. Loengumaterjal, TTÜ, 2010.
- [6] R. H. Khan, and J. Y. Khan. A comprehensive review of the application characteristics and traffic requirements of a smart grid communications network. *Computer Networks*, vol. 57, issue 3, 26 Feb 2013, pp. 825-845.
- [7] IEEE Std C37.118.2 2011, IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems. IEEE, 2011, 53 pp.
- [8] B. Naduvathuparambil, M. C. Valenti, and A. FeXiachi, Communication Delays in Wide Area Measurement Systems. *Proc. Of the 34th Southeastern Symposium on System Theory*, 2002, pp. 118-122.
- [9] Optical fiber cable. Wikipedia.
http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_fiber_cable (30.12.2014).
- [10] Y. Yu, D. Zhang, Y. Wang, and X. Xie. Study on data transmission of RTDMS for power systems. *International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*, 16-20.10.2011, Beijing, China, pp. 2192-2195.
- [11] R. Lira, C. Mycock, D. Wilson, H. Kang. PMU performance requirements and validation for closed loop applications. *ISGT Europe 2011*, 5-7.12.2011, Manchester, UK, 7 pp.
- [12] M. Meldorf, T. Tikk, J. Kilter. *Elektrivõrgu operatiivjuhtimissüsteem*. TTÜ kirjastus, 2010, 352 lk.

2. Ülekandeliinide jälgimine faasimõõturitega

Uurimistöö eelmises etapis uuriti teoreetiliselt ülekandeliinide läbilaskevõime ja kadude määramise meetodikaid ning rakendusi, mis põhinesid erinevatel mudelitel ja välistel mõõtmistel. Töö käesolevas etapis on uuritud ülekandeliinide läbilaskevõime ja kadude otsest määramist faasimõõtmiste andmetest ja on andmete põhjal läbi tehtud näidisarvutusi. Lisaks on jätkatud eelmises etapis kirjeldatud liini soojusbilansi modelleerimist praktilise näitega, milles kasutatakse sisendina reaalseid meteoroloogilisi mõõtmisi ja koormuse andmeid faasimõõtmisest.

Käesolevas peatükis on kõigepealt esitletud näidisarvutusi, milles reaalsete ilmamõõtmiste ja liini koormuse alusel on modelleeritud selle soojusbilanssi, et leida liini temperatuur ja läbilaskevõime. Ülekandeliini soojuslik arvutus IEEE ja Cigre vastavates juhendites toodud mudelitega [1, 2] oli uurimuse eelmises etapis kirjeldatud [3] ning käesolevas aruandes on keskendunud reaalsete tulemuste analüüsile ja kahe mudeli võrdlusele saadud tulemuste põhjal.

Faasimõõturitest (PMU) saadavaid mõõteandmeid on liinide talitluse jälgimisel võimalik kasutada nii otseselt kui ka kaudselt. Kui liini mõlemasse otsa on paigaldatud faasimõõtur, on teoreetiliselt võimalik liini alguse ja lõpu võimsuste vahest leida ülekandekaod. Samas on nendest mõõteandmetest võimalik arvutada liini parameetrid, millest saab leida nii aktiiv- kui ka reaktiivkaod ning liini keskmise temperatuuri ja sellest sõltuva läbilaskevõime ning rippe. Käesolevas peatükis uuritakse liini kadude ja parameetrite määramise võimalusi ning hinnatakse saadud tulemuste kasutatavust.

Selleks, et mõista paremini mõõtmiste ebatäpsusi ja nende põhjusi, on lähemalt uuritud mõõdetud andmetest arvatud hinnangute mõõtemääramatusi. Nii faasimõõturite kui ka neid süsteemiga ühendavate mõõtetetrafode mõõtetulemustes esineb teatud vigu. Käesolevas töös on uuritud nende vigade kandumist otsitavate suuruste hinnangutesse. Faasimõõtmiste liitmääramatuste käsitus on olnud kirjanduses küllaltki piiratud ja seetõttu on nende arvutamiseks uus lähenemine välja töötatud.

Iga alapeatüki lõpus on toodud näited ilmestamiseks erinevaid liinide jälgimise meetodeid ning arvutusi. Arvutuslikud näited on tehtud Aruküla ja Balti EJ alajaamu ühendava liini L511 faasimõõtmiste andmete alusel. Ilmamõõtmised on saadud Keskkonnaagentuuri ilmateenistuse Narva, Jõhvi, Väike-Maarja ning Tallinn-Harku mõõtepunktidest.

2.1. Ülekandeliini soojusliku talitluse hindamine meteoroloogiliste mõõtmiste baasil

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 [1, 2]. Viidatud juhendites on toodud rakenduslikud arvutuskäigud, millest saab arvutada kas teatud temperatuurile vastava suurima lubatava voolu või teatud voolule vastava liinijuhki 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 eelmises osas vaadeldi antud mudeleid lähemalt ja kirjeldati soojusbilansi arvutusi detailselt [3]. Seetõttu ei ole käesolevas aruandes mudelite kirjeldust korratud ja on keskendatud tulemustele, mis on saadud kasutades reaalseid mõõteandmeid. Arvutusmudelites ei ole sisulisi muudatusi tehtud, erinevad on ainult nendes kasutatavad andmed.

Käesoleva aruande jaoks on koostatud rakendus, mis hindab meteoroloogiliste mõõtmiste andmete alusel ülekandeliini koormusele vastavat soojusbilanssi. Antud mõõtmiste ja arvutuste alusel on võimalik jooksvalt hinnata liini töötemperatuuri ja termilist läbilaskevõimet. Taoline estimateerimine on kasutatav olukorras, kus liinidele ei ole paigaldatud temperatuuriandureid, aga on saadaval ilmamõõtmised ülekandeliinide lähedusest.

Arvutustes kasutatud meteoroloogiliste mõõteandmete algallikas on Keskkonnaagentuur.

2.1.1. Lähteandmed

Liini soojusliku talitluse mudeldamisel on kombineeritud meteoroloogilised mõõtmised ja faasimõõtmised. Kuna liini soojenemise ja jahtumise ajakonstant on tavaliselt minutite suurusjärgus [1], on antud näites voolu mõõtmise andmed võetud 5-minutilise sammuga. Samm on võetud küllaltki pikk ka selle pärast, et meteoroloogilised mõõteandmed on hetkel saadaval iga tunni aja tagant, mis tähendab, et vahepealsed väärtused tuleb leida küllaltki pikas vahemikus interpoleerides. Meteoroloogilised mõõteandmed on toodud tabelis 2.1, kus T_A tähistab õhu-

temperatuuri, V_W tuule kiirust ning α tuule suunda. Andmed on saadud neljast vaatluspunktist: Tallinn-Harku, Jõhvi, Narva ja Väike-Maarja.

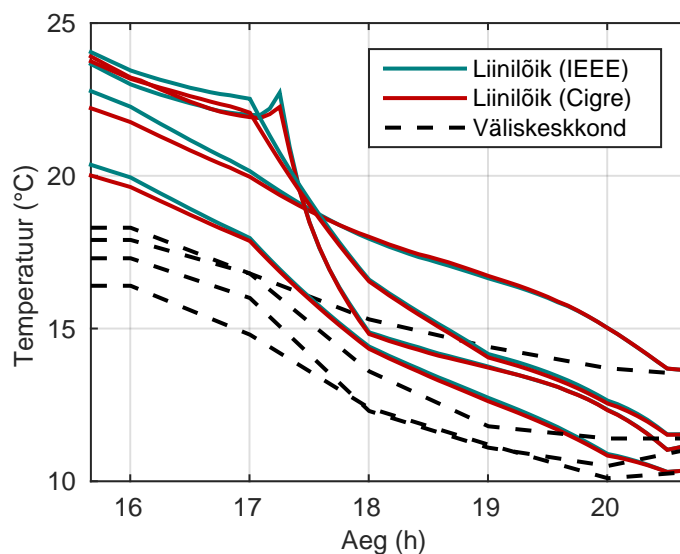
Tabel 2.1 Ilmavaatluspunktide mõõteandmed 3. septembrist 2014. aastal.

Aeg (h)	Tallinn-Harku			Jõhvi			Narva			Väike-Maarja		
	T_A (°C)	V_W (m/s)	α (°)	T_A (°C)	V_W (m/s)	α (°)	T_A (°C)	V_W (m/s)	α (°)	T_A (°C)	V_W (m/s)	α (°)
16	17,9	3,6	252	17,3	1,5	301	16,4	3,0	224	18,3	2,5	289
17	16,8	2,5	248	16,0	0,6	297	14,8	2,2	238	16,8	2,0	270
18	15,3	1,6	239	12,3	1,1	190	12,4	2,0	216	13,6	1,9	255
19	14,4	1,3	228	11,1	0,8	220	11,2	2,2	205	11,8	2,2	256
20	13,7	1,0	220	10,5	1,0	258	10,1	2,4	219	11,4	2,5	259
21	13,4	1,4	216	11,3	1,5	275	10,4	2,1	235	11,4	2,4	277
22	12,6	1,3	208	11,1	1,6	258	10,7	2,5	242	10,4	1,5	267

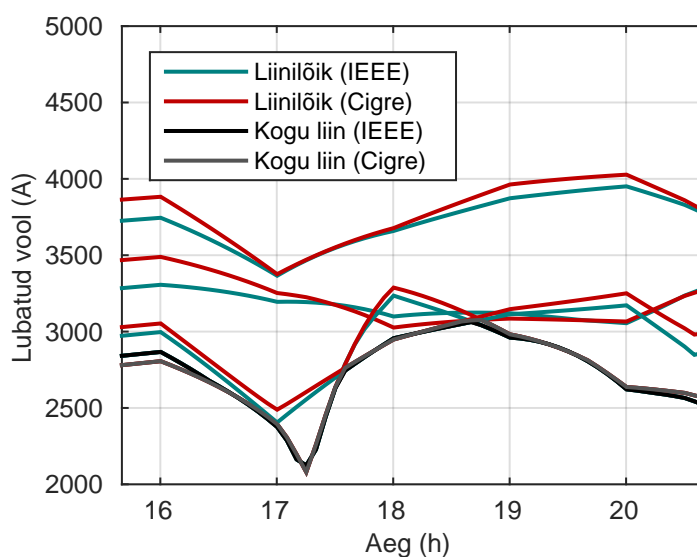
Liini andmetena eeldavad mõlemad mudelid juhi läbimõõtu, takistust teatud temperatuuril, kiirgusliku soojusülekanne neelduvustegurit (ingl k *absorptivity*) ja kiirgamistegurit (ingl k *emissivity*) ning Cigre mudel eeldab lisaks veel juhtme alumiiniumikihtide arvu, ristlõike pindala ning pinnakihi juhi 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°, laiusega 59° ja keskmise kõrgusega merepinnast 75 m.

2.1.2. Arvutuslikud näited

Joonistel 2.1 ja 2.2 on näidatud liini temperatuuri ja läbilaskevõime estimateerimise tulemused mõlemat mudelit kasutades. 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. Hinnatud keskmise temperatuuri alusel on estimateeritud ka liinijuhi keskmist takistust, millele leitud väärtused on toodud joonisel 2.3.



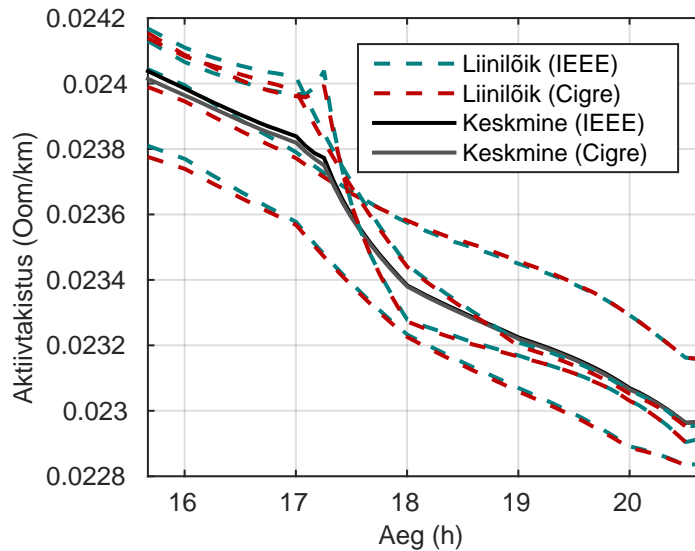
Joonis 2.1 Liini temperatuuri hinnang arvatud mõlema mudeli alusel iga vaatluspunkti andmetest eraldi, tähistatud kui erinevad liinilõigud.



Joonis 2.2 Liini läbilaskevõime hinnang arvatud mõlema mudeli alusel iga vaatluspunkti andmetest eraldi. Kogu liini läbilaskevõimeks on võetud neljast väärtusest vähim.

2.1.3. Analüüs ja järeldused

Näidisarvutused viitavad, et meteoroloogiliste mõõtmiste ja faasimõõtmiste kombineerimisel on võimalik liini soojuslikku talitlust mudeldada. Tulemustest on näha, et nelja erineva ilmavaatlusjaama andmete alusel hinnatud liinijuhi temperatuur muutub ajas küllaltki sarnaselt. Samuti annavad mõlemad mudelid sarnaseid tulemusi. Kuna liinijuhi tegelik temperatuur pole teada, ei saa tulemuste täpsust otseselt hinnata. Arvutatud läbilaskevõime on muutustele tundlikum, kuna liinijuhi soojenemine sõltub seda läbiva voolu ruudust. Lisaks on estimateeritud temperatuuri



Joonis 2.3 Liini takistuse hinnang arvatud mõlema mudeli alusel iga vaatluspunkti andmetest eraldi. Liinijuhi keskmine takistus leitud nelja väärtuse keskmisena.

alusel võimalik ka juhi takistust korrigeerida.

Näidisarvutused annavad alust eeldada, et soojusliku talitluse mudeli alusel on võimalik liini temperatuuri suurusjärku jälgida. Küll aga on raske hinnata tulemuste täpsust, kuna tegelikud väärtused pole teada. Liini soojusbilanss on küllaltki tundlik muutustele tuule kiiruses ja suunas, mis määravad ära konvektiivse jahutuse efektiivsuse. Selleks, et voolu mõõtmine reaalajas annaks sellises monitooringus eelise, oleks oluline tuule kiiruse ja suuna kohta saada väiksema sammuga mõõteandmeid. Vaadeldud meetodi reaalse rakendatavuse hindamiseks oleks vaja arvutusi teostada suurema hulga andmete kohta ning võrrelda tulemusi referentsväärtustega.

2.2. Ülekandeliini parameetrite määratlemine

Faasorite mõõtmistest liini parameetrite arvutamiseks on olemas erineva lihtsustusastmega lahendusi. Enamik lähenemisi põhineb sellel, et liine modelleeritakse kui üksikuid sõltumatuid juhte [4, 5, 6], mis on teoreetiliselt väga lihtsalt rakendatav lahendus. Taoline lihtsustus, mis eeldab, et juhtide omavahelise sidestatuse saab arvestamata jätta, sobib transponeeritud liinidele, aga jääb puudulikuks transponeerimata liinide puhul. Aruandes on faasimõõtmistest liiniparameetrite leidmist lähemalt uuritud. Teoreetiline käsitus esitleb kõigepealt võimalikult täpset meetodit, mis sobib ka transponeerimata liinidele, ja toob välja eelmainitud lihtsustatud lahenduse.

Kurokawa jt on mõõtmistest liiniparameetrite arvutamiseks välja pakkunud modaalteisendustel põhineva lahenduse, mis käsitleb probleemi vähimate füüsikaliste lihtsustustega [7, 8]. Antud

juhul eemaldatakse suuruste omavaheline sidestatus lineaarse teisendusega, mis viib faasisuurused üle modaalsuurusteks. Kui liinivõrrandid on modaalsuuruste suhtes lahendatud, leitakse pöördteisenduse abil lahendused faasisuurustele [9].

Modaalteisenduses kasutatav teisendusmaatriks on üldjuhul tundmatu suurus, kuna see sõltub ise liini parameetritest. See-eest on teada, et kui liin on ideaalselt transponeeritud, leidub selle jaoks lõputu hulk sobivaid teisendusmaatrikseid, mis on liini parameetritest sõltumatud. Eelnevalt mainitud modaalteisendustel põhinevas lähenemises [7] on ühese lahendusena pakutud kasutada Clarke'i teisendusmaatriksit, mis ühtib ühega ideaalselt transponeeritud liini võimalikest teisendusmaatriksitest. Kuna kirjanduses pole põhjendatud, miks just see on eelistatuim valik reaalsele transponeeritud liinidele, on see käesolevas aruandes tuletatud.

Arendustöö tulemusena on tuleviku tarbeks välja pakutud täiendused, mis täpsustavad modaalteisenduste meetodit transponeerimata liinide puhul. Transponeerimata liinide jälgimise küsimus võib esile kerkida faasimõõturite laialdasema paigaldamise korral. Aruandes on näidatud, et teisendusmaatriksit mõjutavad keskkonnamuutustest tingitud liiniparameetrite muutused piisavalt nõrgalt, et selle võib konkreetse liini jaoks konstantseks lugeda. Antud lähenemise korral saab arvutada teisendusmaatriksi liinile projekteeritud parameetrite alusel ühekordselt. Sõltumata väikestest muutustest liini talitluse käigus, on antud teisendusmaatriksiga teostatud arvutused eeldatavalt täpsemad Clarke'i maatriksit kasutavatest arvutustest.

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. Selleks on tuletatud võrrandid vähendatud takistuste ja juhtivuste maatriksitest otsitavate suuruste eraldamiseks. Antud võrrandite abil saab leida ülekandeliini päri-, vastu- ja nulljärgnevustakistused ning -juhtivused, eeldamata et need ei ole omavahel sidestatud.

Näidisarvutustes on vaadeldud nii üldlevinud lihtsustatud lahendust kui ka lähemalt uuritud modaalteisendustel põhinevat lähenemist. Kuna mõõteandmed on saadaval ainult transponeeritud ülekandeliinilt, ei ole teiselt lahendusmeetodilt tingimata täpsemaid tulemusi oodata. Küll aga on mõõteandmete põhjal arvutatud suurusi kõrvutades võimalik kahte meetodit omavahel võrrelda.

2.2.1. Teoreetiline taust

Vaatleme kolmefaasilise jaotatud parameetritega ülekandeliini maatriksnotatsiooni [9, 10, 11]. Faasipinged ja -voolud on liini suvalises punktis antud järgmiselt

$$\mathbf{u}(l) = \begin{bmatrix} \underline{U}_a(l) \\ \underline{U}_b(l) \\ \underline{U}_c(l) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i}(l) = \begin{bmatrix} \underline{I}_a(l) \\ \underline{I}_b(l) \\ \underline{I}_c(l) \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

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 . Takistuse ja juhtivuse vähendatud maatriksid on tähistatud

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \hat{z}_{aa} & \hat{z}_{ab} & \hat{z}_{ac} \\ \hat{z}_{ba} & \hat{z}_{bb} & \hat{z}_{bc} \\ \hat{z}_{ca} & \hat{z}_{cb} & \hat{z}_{cc} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{aa} & \hat{y}_{ab} & \hat{y}_{ac} \\ \hat{y}_{ba} & \hat{y}_{bb} & \hat{y}_{bc} \\ \hat{y}_{ca} & \hat{y}_{cb} & \hat{y}_{cc} \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

Ülaltoodud maatriksid on leitud faasi- ja neutraaljuhtide oma- ja vastastikustest takistusest ning juhtivustest Kroni teisenduse teel [11]. Näitena võib tuua kahe neutraaljuhiga transponeerimata kolmefaasilise liini, mida saab kirjeldada järgmise struktuuriga maatriksi abil

$$\mathbf{Z}_0 = \left[\begin{array}{ccc|cc} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} & z_{au} & z_{aw} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} & z_{bu} & z_{bw} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} & z_{cu} & z_{cw} \\ \hline z_{ua} & z_{ub} & z_{uc} & z_{uu} & z_{uw} \\ z_{wa} & z_{wb} & z_{wc} & z_{wu} & z_{ww} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{Z}_1 & \mathbf{Z}_2 \\ \mathbf{Z}_3 & \mathbf{Z}_4 \end{array} \right] \quad (2.3)$$

kus z_{ii} on juhi i omatakiistus ning z_{ik} on juhtide i ja k vastastikune takistus pikkusühiku kohta, kus a, b, c tähistavad faaside ning u ja w neutraali juhte. Teades vajalikke andmeid, saab ligikaudseid takistusi arvutada järgmiselt

$$z_{ik} = r_{ik} + r_d + j\omega \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{D_{ik}} \left[\frac{\Omega}{\text{m}} \right], \quad (2.4)$$

kus r_{ik} on juhi pikitakiistus, kui $i = k$, ja null, kui $i \neq k$ ning μ_0 on vaakumi magnetiline läbitavus. Neutraalivoolu jagunemist arvestavad parandustegurid [12] on arvestatud suurustesse $r_d = 9.869 \cdot 10^{-7} \Omega/\text{m}$ ja $D_e = 658.5 \sqrt{\rho/f} \text{ m}$, kus ρ on maapinna eritakiistus ja f on süsteemi sagedus [11]. D_{ik} on kahe juhi vaheline kaugus, kui $i \neq k$, ja juhi keskmine geomeetiline raadius, kui $i = k$ [11]. Juhi keskmine geomeetiline raadius sõltub selle raadiusest ja juhtide

arvust, kui on tegemist lõhisfaasidega liiniga. Kroni teisendus teostatakse järgmiselt [11]

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_1 - \mathbf{Z}_2 \mathbf{Z}_4^{-1} \mathbf{Z}_3. \quad (2.5)$$

Põikjuhtivused leitakse potentsiaalikoefitsientide matriksi vahendusel [11]

$$\mathbf{P}_0 = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{P}_1 & \mathbf{P}_2 \\ \hline \mathbf{P}_3 & \mathbf{P}_4 \end{array} \right], \quad (2.6)$$

millel on sama struktuur kui matriksil \mathbf{Z}_0 ning mille elemendid p_{ik} avaldatakse

$$p_{ik} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{H_{ik}}{D'_{ik}} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{F}} \right], \quad (2.7)$$

kus D'_{ik} on nagu D_{ik} , ainult et keskmine geomeetiline raadius loetakse võrdseks tegeliku raadiusega; H_{ik} on vahemaa juhi i ja juhi k kujutise vahel ning ϵ_0 on vaakumi dielektriline läbitavus. Juhi kujutis (ingl k *image*) on kujuteldav juht, mis paikneb samal sügavusel maa all kui on tegeliku juhi keskmine kõrgus maapinna kohal [11]. Kui $i = k$, on H_{ii} juhi kahekordne keskmine kõrgus. Potentsiaalikoefitsientide matriks teisendatakse sarnaselt

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_2 \mathbf{P}_4^{-1} \mathbf{P}_3, \quad (2.8)$$

mis annab juhtivuste matriks kujul

$$\mathbf{Y} = j\omega\mathbf{C} = j\omega\mathbf{P}^{-1}. \quad (2.9)$$

Üldjuhul arvutatakse takistuse ja juhtivuse vähendatud matriksid \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.

Võrrandites (2.1) ja (2.2) antud suurustega kirjeldatud ahela jaoks saab Kirchhoffi seadustest kirjutada [9]

$$\frac{d\mathbf{u}(l)}{dl} = \mathbf{Z}\mathbf{i}(l), \quad (2.10)$$

$$\frac{d\mathbf{i}(l)}{dl} = \mathbf{Y}\mathbf{u}(l), \quad (2.11)$$

mille saab edasi diferentseerida kujule

$$\frac{d^2 \mathbf{u}(l)}{dl^2} = \mathbf{ZY} \mathbf{u}(l), \quad (2.12)$$

$$\frac{d^2 \mathbf{i}(l)}{dl^2} = \mathbf{YZ} \mathbf{i}(l). \quad (2.13)$$

Antud diferentsiaalvõrranditele leiduvad teoreetiliste lahenditena võrrandid maatriksite \mathbf{ZY} ja \mathbf{YZ} suhtes, kuid need avalduvad maatrikseksponentidena ning tundmatute arv ületab võrrandite arvu [10]. Faasisuurustele nende omavahelise sidestatuse tõttu ühest lahendit ei leidu

$$\frac{d^2 \underline{U}_a(l)}{dl^2} = (\mathbf{ZY})_{11} \underline{U}_a(l) + (\mathbf{ZY})_{12} \underline{U}_b(l) + (\mathbf{ZY})_{13} \underline{U}_c(l) \quad \text{jne.} \quad (2.14)$$

See tähendab, et faasimõõtmistest leitud voolude ja pingete väärtustest ei saa otse arvutada liini parameetreid. Antud võrrandisüsteemile leiduks ühene lahend, juhul kui maatriksite \mathbf{ZY} ja \mathbf{YZ} näol oleks tegemist diagonaalmaatriksitega. Seda probleemi on võimalik lahendada, kui need maatriksid modaalteisenduste abil diagonaliseerida, mis eeldab aga teisendusmaatriksi leidmist [9].

2.2.2. Modaalanalüüs

Modaalanalüüs põhineb voolu- ja pingefaasorite lineaarteisendusel, mis viib sidestatud faasisuurused üle lahtisidestatud modaalsuurusteks [13]. Modaal suurusi tähistatakse

$$\mathbf{u}'(l) = \begin{bmatrix} \underline{U}_0(l) \\ \underline{U}_1(l) \\ \underline{U}_2(l) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i}'(l) = \begin{bmatrix} \underline{I}_0(l) \\ \underline{I}_1(l) \\ \underline{I}_2(l) \end{bmatrix}, \quad (2.15)$$

kus indeksid 0, 1 ja 2 tähistavad moode.

Faasi- ja modaalsuurusi seob omavahel teisendusmaatriks, nii et [9]

$$\mathbf{u}(l) = \mathbf{T}_u \mathbf{u}'(l), \quad (2.16)$$

$$\mathbf{i}(l) = \mathbf{T}_i \mathbf{i}'(l). \quad (2.17)$$

Asendades need võrranditesse (2.12) ja (2.13) ning eeldades, et teisendusmaatriks on asukohast l sõltumatu, võib kirjutada

$$\frac{d^2 \mathbf{u}'(l)}{dl^2} = \mathbf{T}_u^{-1} \mathbf{ZY} \mathbf{T}_u \mathbf{u}'(l), \quad (2.18)$$

$$\frac{d^2\mathbf{i}'(l)}{dl^2} = \mathbf{T}_i^{-1}\mathbf{Y}\mathbf{Z}\mathbf{T}_i\mathbf{i}'(l). \quad (2.19)$$

Modaalanalüüs põhineb maatriksite $\mathbf{Z}\mathbf{Y}$ ja $\mathbf{Y}\mathbf{Z}$ diagonaliseerimisel. See tähendab, et teisendusmaatriksid \mathbf{T}_u ja \mathbf{T}_i valitakse selliselt, et tagada [9, 13]

$$\langle \boldsymbol{\lambda}_u \rangle = \mathbf{T}_u^{-1}\mathbf{Z}\mathbf{Y}\mathbf{T}_u, \quad (2.20)$$

$$\langle \boldsymbol{\lambda}_i \rangle = \mathbf{T}_i^{-1}\mathbf{Y}\mathbf{Z}\mathbf{T}_i, \quad (2.21)$$

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

$$\langle \boldsymbol{\lambda}_u \rangle = \langle \boldsymbol{\lambda}_i \rangle = \langle \boldsymbol{\lambda} \rangle = \begin{bmatrix} \lambda_0 & & \\ & \lambda_1 & \\ & & \lambda_2 \end{bmatrix}. \quad (2.22)$$

Seejärel defineeritakse levimaatriks

$$\boldsymbol{\Gamma} = (\mathbf{Z}\mathbf{Y})^{1/2}, \quad (2.23)$$

mille omaväärtused on modaalsed levitegurid γ_0, γ_1 ja γ_2 [9]. Omaväärtuste omaduste põhjal ilmneb, et $\langle \boldsymbol{\gamma}^2 \rangle = \langle \boldsymbol{\lambda}_u \rangle = \langle \boldsymbol{\lambda}_i \rangle$. Modaalne lainetakistusmaatriks defineeritakse kujul [9]

$$\langle \mathbf{z}_c \rangle = \langle \boldsymbol{\gamma} \rangle^{-1}\mathbf{T}_u^{-1}\mathbf{Z}\mathbf{T}_u = \begin{bmatrix} z_0 & & \\ & z_1 & \\ & & z_2 \end{bmatrix}. \quad (2.24)$$

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

Seejärel saab võrrandid (2.18) ja (2.19) kirjutada kujul

$$\frac{d^2\mathbf{u}'(l)}{dl^2} = \langle \boldsymbol{\gamma}^2 \rangle \mathbf{u}'(l), \quad (2.25)$$

$$\frac{d^2\mathbf{i}'(l)}{dl^2} = \langle \boldsymbol{\gamma}^2 \rangle \mathbf{i}'(l). \quad (2.26)$$

Nende diferentsiaalvõrrandite lahendamine annab võrrandid kolmefaasilise jaotatud parameet-

ritega liini modaalsuurustele, mille saab maatrikskujul kirja panna järgmiselt [9]

$$\mathbf{u}'(l) = \cosh\langle\gamma l\rangle\mathbf{u}'(0) + \langle\mathbf{z}_c\rangle \sinh\langle\gamma l\rangle\mathbf{i}'(0), \quad (2.27)$$

$$\mathbf{i}'(l) = \langle\mathbf{z}_c\rangle^{-1} \sinh\langle\gamma l\rangle\mathbf{u}'(0) + \cosh\langle\gamma l\rangle\mathbf{i}'(0), \quad (2.28)$$

kus

$$\cosh\langle\gamma l\rangle = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_0 l) & & \\ & \cosh(\gamma_1 l) & \\ & & \cosh(\gamma_2 l) \end{bmatrix} \text{jne.} \quad (2.29)$$

Need võrrandid saab omakorda modaalsuuruste jaoks lahti kirjutada

$$\underline{U}_m(l) = \cosh(\gamma_m l)\underline{U}_m(0) + z_{cm} \sinh(\gamma_m l)\underline{I}_m(0), \quad (2.30)$$

$$\underline{I}_m(l) = \frac{1}{z_{cm}} \sinh(\gamma_m l)\underline{U}_m(0) + \cosh(\gamma_m l)\underline{I}_m(0). \quad (2.31)$$

Teades modaalpingeid ja -voole liini otstes, saab kogu liini pikkuse jaoks suurused γ_m ja z_{cm} (ja vastavalt $\langle\gamma\rangle$ ning $\langle\mathbf{z}_c\rangle$) avaldada järgmiselt [7]

$$\gamma_m = \frac{1}{d} \operatorname{arcosh} \left[\frac{\underline{U}_m(d)\underline{I}_m(d) + \underline{U}_m(0)\underline{I}_m(0)}{\underline{U}_m(0)\underline{I}_m(d) + \underline{U}_m(d)\underline{I}_m(0)} \right], \quad (2.32)$$

$$z_{cm} = \frac{\underline{U}_m(0) \sinh(\gamma_m d)}{\underline{I}_m(d) - \underline{I}_m(0) \cosh(\gamma_m d)}. \quad (2.33)$$

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

Faasisuuruste jaoks saab takistuse ja juhtivuse vähendatud maatriksid leida pöördteisendustest [9]

$$\mathbf{Z} = \mathbf{T}_u\langle\gamma\rangle\langle\mathbf{z}_c\rangle\mathbf{T}_i^{-1}, \quad (2.34)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{T}_i\langle\gamma\rangle\langle\mathbf{z}_c\rangle^{-1}\mathbf{T}_u^{-1}. \quad (2.35)$$

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 $\mathbf{u}'(l) = \mathbf{u}(l)$ ning $\mathbf{i}'(l) = \mathbf{i}(l)$ ja leida liini parameetrid võrranditest (2.32) ja (2.33). 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

$$\underline{z}_i = \gamma_i \underline{z}_{ci} = r_i + jx_i, \quad (2.36)$$

$$\underline{y}_i = \frac{\gamma_i}{\underline{z}_{ci}} = g_i + jb_i. \quad (2.37)$$

2.2.3. Transponeeritud liinid

Modaalteisendusi on põhjalikult uuritud, selleks et neid rakendada ülekandeliinide sagedusest sõltuvatena modelleerimisel [13, 14, 15, 16]. Pikka aega on olnud teada, et Clarke'i teisendusmaatriks ühtib ühega ideaalselt transponeeritud liinile sobivatest modaalteisenduse maatriksitest. Lisaks sellele on teada, et transponeerimata liinide teisendusmaatriksid on Clarke'i maatriksiga väga sarnased [9, 14]. Aruande autorid ei ole aga leidnud varemavaldatud põhjendust, miks peaks transponeeritud liinide puhul just seda ühte lahendust eelistama teistele lõpmata paljudest võimalikest variantidest.

Teisendusmaatriksite lähemalt uurimiseks naaseme võrrandite (2.20) ja (2.21) juurde. Tähistame $\mathbf{A} = \mathbf{Z}\mathbf{Y}$ ja korrutame võrrandi (2.20) vasakult maatriksiga \mathbf{T}_u , et kirjutada

$$\mathbf{T}_u \langle \boldsymbol{\lambda} \rangle = \mathbf{A} \mathbf{T}_u. \quad (2.38)$$

Tulemuseks on omaväärtuste võrrand, kus λ_0 , λ_1 ja λ_2 on maatriksi \mathbf{A} omaväärtused. Samal ajal moodustavad \mathbf{A} omavektorid \mathbf{v}_0 , \mathbf{v}_1 ja \mathbf{v}_2 maatriksi \mathbf{T}_u tulbad. Ilmnebki, et teisendusmaatriks \mathbf{T}_u on määratud maatriksi \mathbf{A} omavektoritega, kusjuures nende järjekord ega kordsus pole oluline [9]. Sarnaselt on teisendusmaatriks \mathbf{T}_i määratud maatriksi $\mathbf{Y}\mathbf{Z} = \mathbf{A}^T$ omavektoritega.

Omavektorite analüüsi alustame ideaalselt transponeeritud süsteemist, st eeldame esimeses lähenduses

$$\mathbf{A}' = \begin{bmatrix} \underline{z}_i & \underline{z}_k & \underline{z}_k \\ \underline{z}_k & \underline{z}_i & \underline{z}_k \\ \underline{z}_k & \underline{z}_k & \underline{z}_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{y}_i & \underline{y}_k & \underline{y}_k \\ \underline{y}_k & \underline{y}_i & \underline{y}_k \\ \underline{y}_k & \underline{y}_k & \underline{y}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q & s & s \\ s & q & s \\ s & s & q \end{bmatrix}, \quad (2.39)$$

kus q ja s on endiselt kompleksuurused, aga tähistatud lihtsustatult. Maatriksil \mathbf{A}' on kaks unikaalset omaväärtust: $\lambda'_0 = q + 2s$ ja $\lambda'_1 = \lambda'_2 = q - s$, mis toob kaasa lõputu hulga omavektoritest $[1, 1, 1]^T$ ja $[1, x, -1 - x]^T$, $x \in \mathbb{C}$ moodustuvaid teisendusmaatrikseid. Iga selliselt moodustatud maatriks on korrektne teisendumaatriks ideaalselt transponeeritud süsteemi jaoks. Samas ei ole põhjust eeldada, et need sobivad ühtviisi hästi, kui reaalses süsteemis esineb kõrvalekaldeid ideaalsest juhust. Paratamatud kõrvalekaldeid tekivad juba ainuüksi statistilistest mõõtevigadest,

rääkimata tegelikest asümmeetriatest ja muudest vigadest.

Selle probleemi selgitamiseks vaatleme järgnevat maatriksit

$$\mathbf{A}'' = \begin{bmatrix} q & s & s' \\ s & q & s \\ s' & s & q \end{bmatrix}, \quad (2.40)$$

kus suurusele s on sisse viidud hälve Δs , nii et $s' = s + \Delta s$.

Vastav omaväärtuste võrrand avaldub

$$\det(\mathbf{A}'' - \lambda''\mathbf{I}) = 0, \quad (2.41)$$

kus \mathbf{I} on ühikmaatriks. Siit saab edasi avaldada

$$\begin{aligned} \det(\mathbf{A}'' - \lambda''\mathbf{I}) &= (q - s' - \lambda'') \times \\ & [q^2 + q(s' - 2\lambda'') - 2s^2 + \lambda''(\lambda'' - s')] = 0, \end{aligned} \quad (2.42)$$

mille nullkohad on

$$\begin{aligned} \lambda_0'' &= q - s', \\ \lambda_1'' &= \frac{1}{2} \left(2q + s' - \sqrt{8s^2 + s'^2} \right), \\ \lambda_2'' &= \frac{1}{2} \left(2q + s' + \sqrt{8s^2 + s'^2} \right). \end{aligned} \quad (2.43)$$

Vastavad omavektorid avalduvad

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_0'' &= [-1, 0, 1]^T, \\ \mathbf{v}_1'' &= \left[1, \frac{3ss' - s\sqrt{8s^2 + s'^2}}{2s^2 + s'^2 - s'\sqrt{8s^2 + s'^2}}, 1 \right]^T, \\ \mathbf{v}_2'' &= \left[1, \frac{3ss' + s\sqrt{8s^2 + s'^2}}{2s^2 + s'^2 + s'\sqrt{8s^2 + s'^2}}, 1 \right]^T. \end{aligned} \quad (2.44)$$

Ilmneb, et maatriksil \mathbf{A}'' on kolm unikaalset omaväärtust ja omavektorit.

Maatriks \mathbf{A}'' defineeriti eeldusel, et $s' = s + \Delta s$, seega uurime piirväärtust, kus Δs läheneb

nullile. On näha, et omavektori \mathbf{v}_1'' keskmise elemendi puhul

$$\lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{3ss' - s\sqrt{8s^2 + s'^2}}{2s^2 + s'^2 - s'\sqrt{8s^2 + s'^2}} = \begin{cases} -2 & \text{kui } s > 0 \\ 1 & \text{kui } s \leq 0 \end{cases} \quad (2.45)$$

ning \mathbf{v}_2'' jaoks

$$\lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{3ss' + s\sqrt{8s^2 + s'^2}}{2s^2 + s'^2 + s'\sqrt{8s^2 + s'^2}} = \begin{cases} 1 & \text{kui } s \geq 0 \\ -2 & \text{kui } s < 0 \end{cases}. \quad (2.46)$$

Lisaks ilmneb, et ideaalselt transponeeritud liini teisendusmaatriksid \mathbf{T}_i ja \mathbf{T}_u on võrdsed.

Kui $\Delta s \rightarrow 0$, moodustub omavektoritest ühene lahend teisendusmaatriksile, mis õigesti skaleerituna ühtib ühe variandiga Clarke'i teisendusmaatriksist [14]

$$\mathbf{T}_C = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{6} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{3} \\ -2/\sqrt{6} & 0 & 1/\sqrt{3} \\ 1/\sqrt{6} & -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{3} \end{bmatrix}. \quad (2.47)$$

Tasub meeles pidada, et selle maatriksi tulpi võib ringi tõsta ning skalaaridega läbi korrutada, ilma et see mõjutaks modaalteisendust.

Selle tulemuse olulisus ilmneb näiteks olukorras, kui hakatakse programmeerima arvutusi teostatavat rakendust. Ideaalselt transponeeritud liini teisendusmaatriksi võiks moodustada ka omavektoritest $[1, 1, 1]^T$, $[1, 0, -1]^T$ ja $[1, -1, 0]^T$ või $[1, 1, 1]^T$, $[1, 0, -1]^T$ ja $[1, 1, -2]^T$. Kuna ükski tegelik liin ei ole ideaalselt transponeeritud, tagab parima täpsuse siiski eelnevalt leitud teisendusmaatriks omavektoritest $[1, 1, 1]^T$, $[1, 0, -1]^T$ ja $[1, -2, 1]^T$.

2.2.4. Transponeerimata liinid

Transponeerimata liinile leidub kaks erinevat liini parameetritest sõltuvat üheselt määratud teisendusmaatriksit. Üldjuhul leitakse need mõlemad takistuse ja juhtivuse vähendatud maatriksitest \mathbf{Z} ja \mathbf{Y} , mis on liini andmetest arvutatud. Sellised arvutused on ülekandeliinide jaoks tavalised [11, 17]. On selge, et sellised arvutused sisaldavad lihtsustusi (nt maapinna eritakistus) ning neid on keeruline kasutada muutlikes oludes (nt temperatuuri muutumisel).

Sellele vaatamata on püstitatud hüpotees, et modaalteisendusmaatriksid on sellistest muutustest piisavalt nõrgas seoses, et need võib liini jaoks konstantseks lugeda, st need võib konkreetsele liinile ühekordselt välja arvutada. Järgnevalt on selle hüpoteesi kontrollimiseks numbriliselt analüüsitud teisendusmaatriksite tundlikkust erinevate parameetrite muutumisele. Alapeatükis

2.2.1 toodud liiniparameetrite arvutuses on kaks suurimat määramatust pinnase eritakistuse ning juhi temperatuuri määramisel. Temperatuur mõjutab nii liinijuhi aktiivtakistust kui ka ripet ning selle kaudu liini geometriat. Järgnevas on eeldatud, et kõikide ülejäänud mõõtmete ning juhi parameetrite võimalikud muutused on tühised.

Numbrilises tundlikkuse analüüsis on sammhaaval varieeritud kõigepealt juhi temperatuuri ja seejärel maapinna eritakistust. Iga muutust arvestades on uuesti arvutatud kõik takistused ja juhtivused, nende maatriksid ning modaalteisenduse maatriksid. Nagu eelnevas alapeatükis näidati, saab teisendusmaatrikseid skaleerida selliselt, et ainult kaks elementi on sõltuvad muutustest takistuste ja juhtivuste maatriksites. Seetõttu on kummaski teisendusmaatriksis vaadeldud ainult neid kahte elementi ning nende suhtelisi muutusi võrreldes baasjuhuga (kus temperatuuri muutus on null ja maapinna eritakistus $100 \Omega \cdot m$).

Aktiivtakistuse sõltuvust temperatuurist kirjeldatakse järgmiselt

$$r_{ik} = r_{\text{ref}}(1 + \alpha\Delta T), \quad (2.48)$$

kus r_{ik} on võrrandis (2.4) esinev aktiivtakistus, r_{ref} on liini andmetest teatud temperatuuri jaoks arvutatud või mõõdetud takistus, ΔT on temperatuuri muutus ning α on takistuse temperatuurikoefitsient [17].

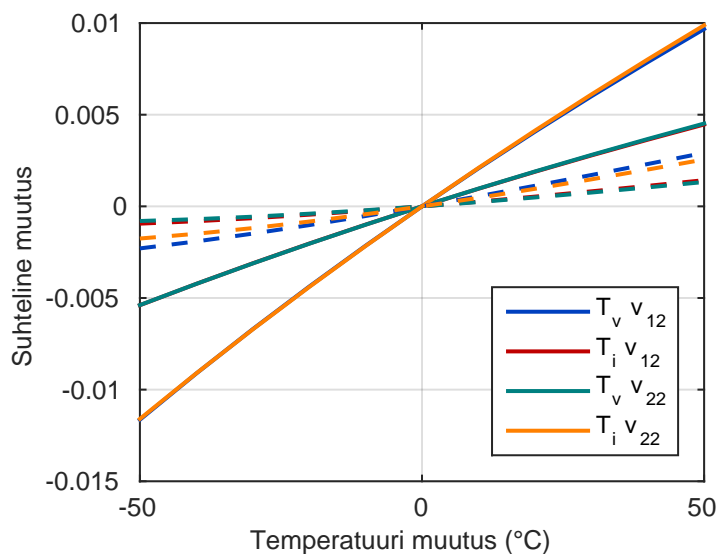
Liini keskmist ripet saab lihtsustatult arvutada järgmiselt

$$h = \sqrt{\frac{3}{8}d \left[\left(d + \frac{8h_{\text{ref}}}{3d} \right) \left(1 + \xi\Delta T \right) - d \right]}, \quad (2.49)$$

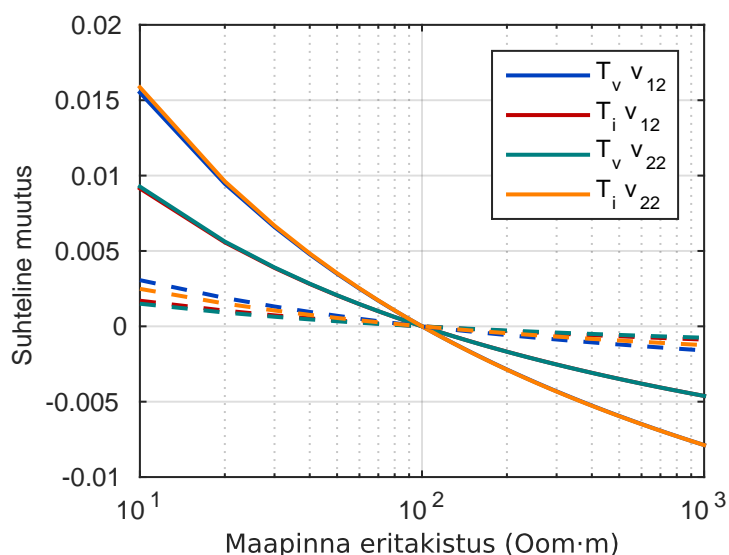
kus d on keskmine vahemaa kahe masti vahel, h_{ref} on liini andmetest arvutatud keskmine ripe teatud temperatuuril ning ξ on termilise pikenemise tegur [18].

Järgnevalt on joonistel 2.4 ja 2.5 toodud arvutuste tulemused. Graafikutelt on näha, et ka suured muutused vaadeldud suurustes mõjutavad teisendusmaatrikseid väga vähe. Kui esitletud suhtelised muutused teisendusmaatriksite elementides jäävad paari protsendi kanti, siis samade arvutuste käigus on muutused liini takistustes kümnetes protsentides. Saadud tulemustest võib järeldada, et konkreetse liini jaoks võib modaalteisenduste maatriksid arvutada ühekordselt ja need edaspidi konstantseks lugeda.

Antud järeldus on ootuspärane, kui mõelda varem kirjeldatud transponeeritud liinide teisendusmaatriksile, mis ei ole samuti sõltuv kõiki faase ühetaoliselt mõjutavatest muutustest. Transponeerimata liini teisendusmaatriksid erinevad transponeeritud liini omast faasidevahelise asüm-



Joonis 2.4 Suhteline muutus teisendusmaatriksite elementides juhi temperatuuri muutumisel. Pidev joon tähistab elemendi reaali- ja kriipsjoon imaginaarkomponenti.



Joonis 2.5 Suhteline muutus teisendusmaatriksite elementides maapinna eritakistuse varieerumise korral. Pidev joon tähistab elemendi reaali- ja kriipsjoon imaginaarkomponenti.

meetria tõttu. Kui välised muutused mõjutavad kõiki faase ühtmoodi, siis suhteline asümmeetria jääb samaks ja seetõttu ei muutu ka teisendusmaatriksid. See tähendab, et mõõtmistes võib transponeerimata liinile selle andmete alusel arvutada korrektsed modaalteisendusmaatriksid, mitte kasutada lihtsustusena eelpool kirjeldatud Clarke'i maatriksit, ning teisendusmaatriksid konstantseks lugeda ja mõõtmiste käigus jälgida muutusi liiniparameetrites.

2.2.5. Suuruste eraldamine vähendatud maatriksitest

Võrrandites (2.2)–(2.5) kirjeldati vähendatud takistuste maatriksi leidmist liini andmetest. Käesolevas töös on oluline selle pöördtehe ehk mõõdetud vähendatud maatriksitest liiniparameetrite leidmine. Näiteks sisaldub konkreetsele juhile vastav impedants maatriksis \mathbf{Z}_1 , mis on vastavalt võrrandile (2.5) seotud mõõdetava vähendatud maatriksiga \mathbf{Z} järgmiselt

$$\mathbf{Z}_1 = \mathbf{Z} + \mathbf{Z}_2 \mathbf{Z}_4^{-1} \mathbf{Z}_3. \quad (2.50)$$

Ideaalselt transposeeritud liini takistuste maatriks on tasakaalustatud ehk selle diagonaalelemendid on võrdsed ja kõik ülejäänud elemendid on omavahel võrdsed

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z_i & z_k & z_k \\ z_k & z_i & z_k \\ z_k & z_k & z_i \end{bmatrix}. \quad (2.51)$$

Sellise maatriksi jaoks on näidatud, et päri-, vastu- ja nulljärgnevustakistused avalduvad järgmiselt [11, 19]

$$z_1 = z_i - z_k \quad (2.52a)$$

$$z_2 = z_i - z_k \quad (2.52b)$$

$$z_0 = z_i + 2z_k, \quad (2.52c)$$

ning samas on järgnevustakistused võrdsed maatriksi \mathbf{Z} omaväärtustega [19]. Ideaalselt transposeeritud liini pärijärgnevustakistuse võib lugeda võrdseks faasi takistusega, mis annab viimase leidmiseks esimese lähenduse.

Probleem muutub keerulisemaks, kui vähendatud takistuste maatriks ei ole tasakaalustatud, st liin ei ole ideaalselt transposeeritud. Vertikaalse sümmeetriatasandiga ülekandeliini vähendatud takistuste maatriks avaldub üldiselt järgmise sümmeetriaga

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z_a & z_d & z_e \\ z_d & z_b & z_d \\ z_e & z_d & z_a \end{bmatrix}. \quad (2.53)$$

Sellise struktuuriga maatriksi üks omaväärtustest on $z_a - z_e$, mis on analoogne eelnevalt vaadeldud maatriksi kahe võrdse omaväärtusega.

Kui liinil on üksainus neutraaljuht (tähistatud kui u), siis avaldub vähendatud komplekstakistus vastavalt võrrandile (2.5) järgmiselt [11]

$$\hat{z}_{aa} = z_{aa} - \frac{2z_{au}}{z_{uu}}, \quad (2.54)$$

kahe neutraaljuhi korral on avaldis järgmine

$$\hat{z}_{aa} = z_{aa} - \frac{z_{au}z_{ww}z_{ua} - 2z_{au}z_{uw}z_{wa} + z_{aw}z_{uu}z_{wa}}{z_{uu}z_{ww} - z_{uw}^2}. \quad (2.55)$$

Vastastikused takistused avalduvad kujul

$$\hat{z}_{ac} = z_{ac} - \frac{z_{au}z_{uc}}{z_{uu}}, \quad (2.56)$$

või

$$\hat{z}_{ac} = z_{ac} - \frac{z_{au}z_{ww}z_{uc} - z_{au}z_{uw}z_{wc} - z_{aw}z_{wu}z_{uc} + z_{aw}z_{uu}z_{wc}}{z_{uu}z_{ww} - z_{uw}^2}. \quad (2.57)$$

Kasutades neid avaldise, võib ühe neutraaljuhiga süsteemi jaoks eelneva maatriksi omaväärtuse $z_a - z_e$ lahti kirjutada kui [11]

$$\hat{z}_{aa} - \hat{z}_{ac} = z_{aa} - z_{ac} - \frac{2z_{au}}{z_{uu}} + \frac{z_{au}z_{uc}}{z_{uu}}, \quad (2.58)$$

mille esimesed kaks liiget moodustavad

$$\begin{aligned} z_{aa} - z_{ac} &= r_{aa} + r_d + j\omega \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{D_{aa}} - r_d - j\omega \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{D_{ac}} = \\ &= r_{aa} + j\omega \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{D_{aa}} + j\omega \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \ln D_{ac} = \\ &= r_{aa} + j\omega \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{ac}}{D_s} = r_{aa} + j(x_{aa} + x_{ad}). \end{aligned} \quad (2.59)$$

Teised kaks liiget [11]

$$\frac{z_{au}z_{uc}}{z_{uu}} - \frac{2z_{au}}{z_{uu}} = -\frac{\omega^2 (\mu_0/2\pi)^2 M}{z_{uu}}, \quad (2.60)$$

kus

$$M = \left(\ln \frac{D_e}{D_{au}} \right)^2 - \left(\ln \frac{D_e}{D_{au}} \right) \left(\ln \frac{D_e}{D_{cu}} \right) \quad (2.61)$$

ning

$$z_{uu} = r_{uu} + r_d + j\omega \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{D_{uu}}. \quad (2.62)$$

Kuna realistlikes süsteemides on $D_e \gg D_{au}$, on M ligikaudu null ning sama saab näidata ka rohkem kui ühe neutraaljuhiga olukordade jaoks [11]. See tähendab, et

$$\hat{z}_{aa} - \hat{z}_{ac} \cong r_{aa} + j(x_{aa} + x_{ad}), \quad (2.63)$$

kus r_{aa} on juhi aktiivtakistus. Lisaks on avaldises induktiivtakistused, mis transponeeritud liini puhul vastavad otseselt pärijärgnevustakistuse vastavatele komponentidele. Sama põhimõtet saab laiendada ka liini põikjuhtivustele [11].

Eelnevad põhimõtted on üldjuhul täpsemad ideaalselt transponeeritud liinide puhul, aga lubavad lihtsustusena hinnata otsitavaid parameetreid ka realistlike liinide puhul. Mõõtmiste põhjal arvatud vähendatud takistuste maatriksist saab mõõdetavale pärijärgnevustakistusele ekvivalentse suuruse leida kas omaväärtustena või diagonaal- ja kõrvalelementide vahedena. See tähendab, et teoreetiliselt on võimalik faasimõõtmistest arvutada soovitud liiniparameetreid ka ilma ideaalse transpositsiooni eelduseta, olgu see siis ebatäiuslikult transponeeritud või transponeerimata liinide jaoks.

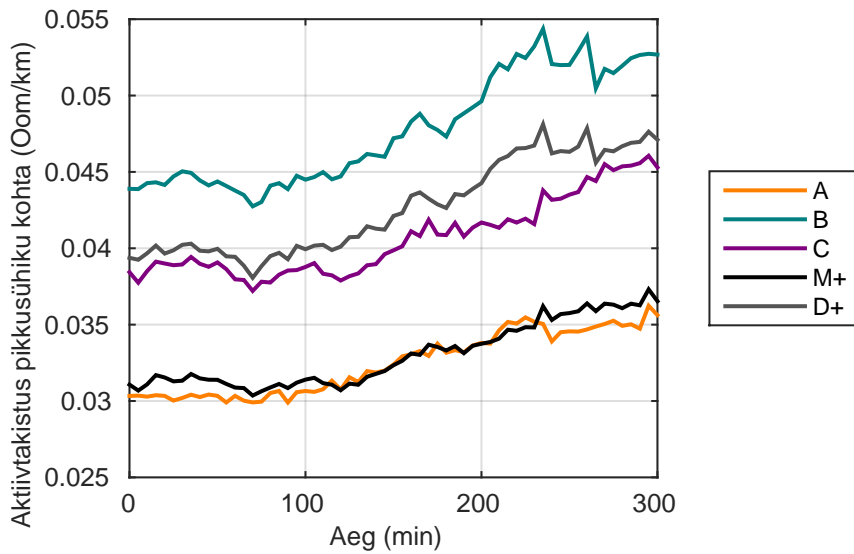
2.2.6. Arvutuslikud näited

Näidisarvutustes on rakendatud erinevaid meetodeid liiniparameetrite leidmiseks. Vaadeldud on kahte viietunnist ajaperioodi erinevatest päevadest, so 3.09.2014 ja 21.11.2014. Perioode eristavad teistsugused ilmaolud ja erinev, aga mõlemal juhul pigem väike, koormus. Suuruste sidestatust arvestamata on leitud faaside ja sümmeetriliste komponentide takistused ja juhtivused. Lisaks on modaalteisenduste abil leitud sümmeetrilistele komponentidele vastavad väärtused sidestatust arvestades.

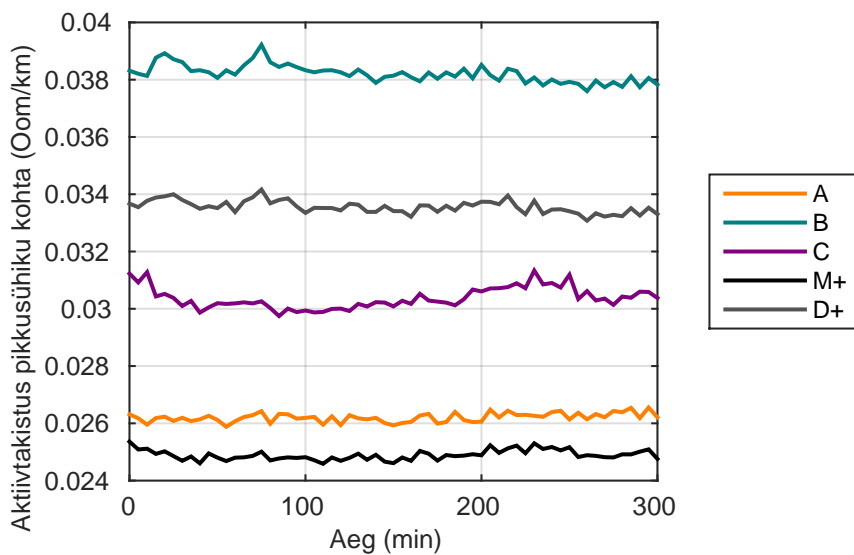
Joonistel 2.6–2.9 on näidatud faaside ja pärijärgnevuskomponentide aktiiv- ja reaktiivtakistuste väärtused. Pärisjärgnevustakistus on leitud kahel viisil: otseselt mõõdetud pärisjärgnevuspingetest ja -vooludest ning modaalteisenduse kaudu. Liinijuhi mõõdetud referentstakistus 25 °C juures on $0.0243 + j0.2945 \Omega/\text{km}$.

Joonistel 2.10–2.13 on toodud faaside ja pärijärgnevuskomponentide põikjuhtivuste väärtused. Juhtivused on leitud samadel põhimõtetel kui takistusedki. Liini faasile vastav arvutuslik mahtuvusjuhtivus on $4.238 \cdot 10^{-6} \text{ S/km}$.

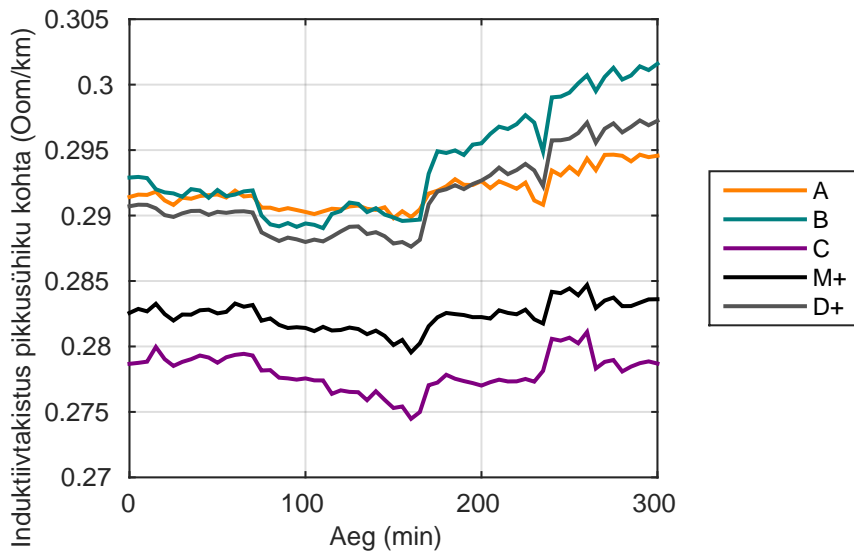
Joonistel 2.14 ja 2.15 on näidatud mõõdetud liiniparameetrite suhtelised vead. Vaadeldud on viga aktiivtakistuses, mis on mõõdetud otseselt igast faasist ja pärijärgnevussuurustest ning leitud modaalteisenduste abil. Joonisel 2.14 on võrdluseks toodud faasisuurustest otse mõõdetud induktiivtakistuse ja mahtuvusjuhtivuse vead kolme faasi keskmisena.



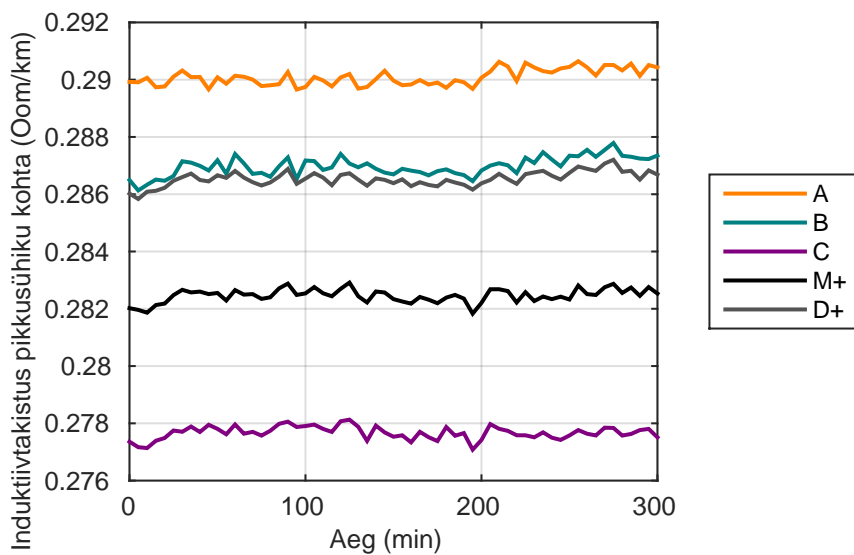
Joonis 2.6 Liini aktiivtakistus pikkusühiku kohta, 3.09.2014. Toodud on otse faasisuurustest (A, B, C) ning pärijärgnevuskomponentidest (D+) leitud suurused ja modaalteisndusega leitud suurus (M+).



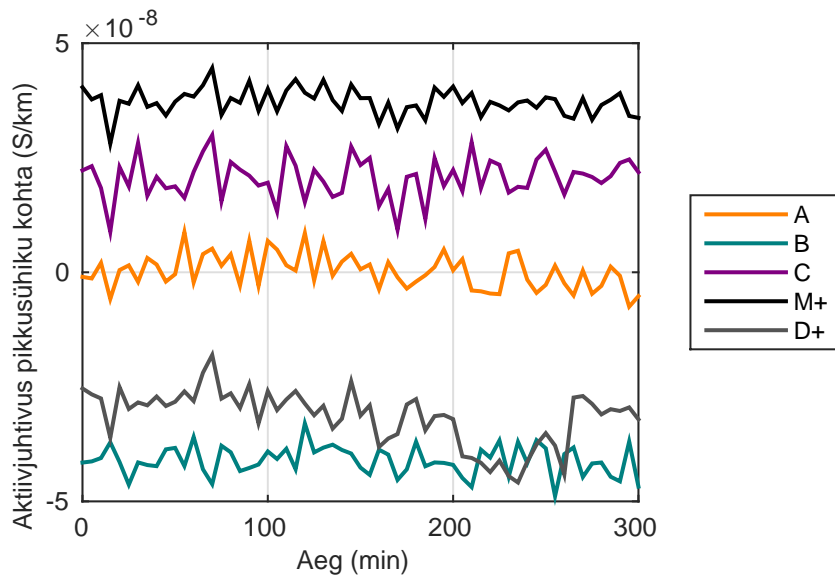
Joonis 2.7 Liini aktiivtakistus pikkusühiku kohta, 24.11.2014. Toodud on otse faasisuurustest (A, B, C) ning pärijärgnevuskomponentidest (D+) leitud suurused ja modaalteisndusega leitud suurus (M+).



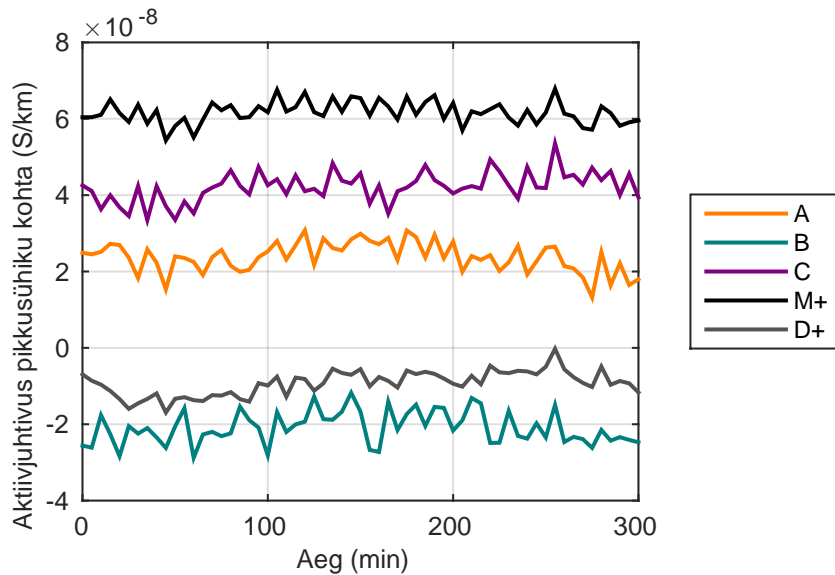
Joonis 2.8 Liini induktiivtakistus pikkusühiku kohta, 3.09.2014. Toodud on otse faasisuurustest (A, B, C) ning pärijärgnevuskomponentidest (D+) leitud suurused ja modaalteisndusega leitud suurus (M+).



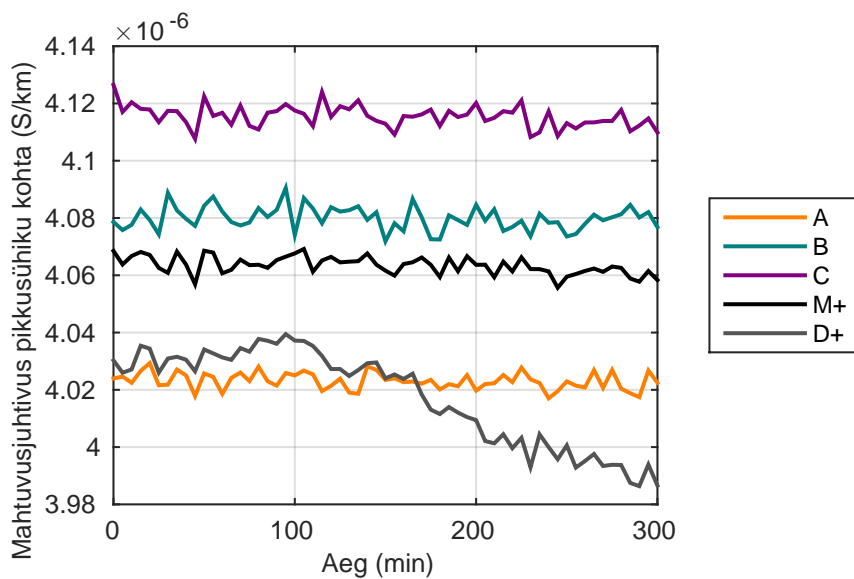
Joonis 2.9 Liini induktiivtakistus pikkusühiku kohta, 24.11.2014. Toodud on otse faasisuurustest (A, B, C) ning pärijärgnevuskomponentidest (D+) leitud suurused ja modaalteisndusega leitud suurus (M+).



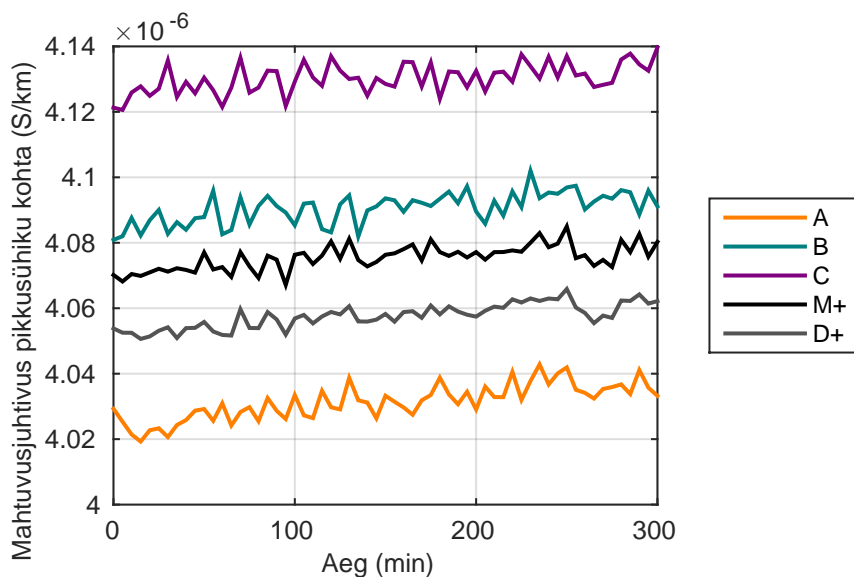
Joonis 2.10 Liini põikaktiivjuhtivus pikkusühiku kohta, 3.09.2014. Toodud on otse faasisuurustest (A, B, C) ning pärijärgnevuskomponentidest (D+) leitud suurused ja modaalteisndusega leitud suurus (M+).



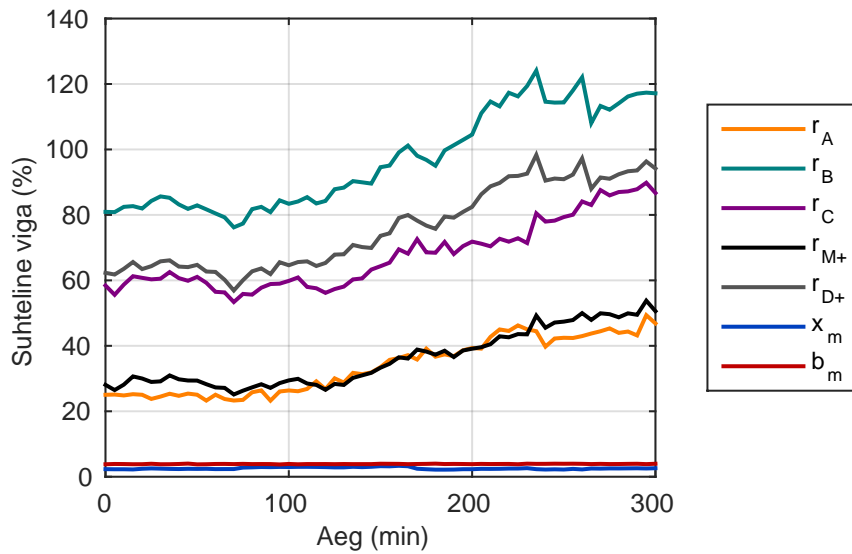
Joonis 2.11 Liini põikaktiivjuhtivus pikkusühiku kohta, 24.11.2014. Toodud on otse faasisuurustest (A, B, C) ning pärijärgnevuskomponentidest (D+) leitud suurused ja modaalteisndusega leitud suurus (M+).



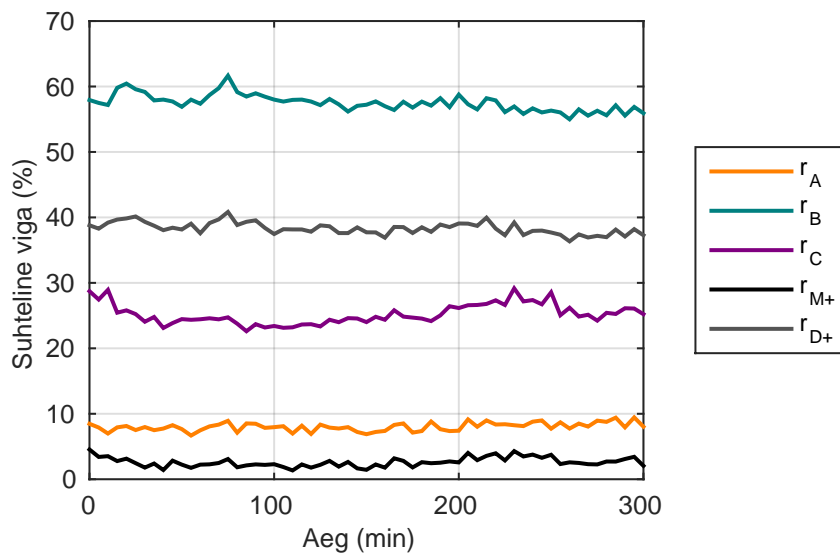
Joonis 2.12 Liini põikmahtuvusjuhtivus pikkusühiku kohta, 3.09.2014. Toodud on otse faasisuurustest (A, B, C) ning pärijärgnevuskomponentidest (D+) leitud suurused ja modaalteisndusega leitud suurus (M+).



Joonis 2.13 Liini põikmahtuvusjuhtivus pikkusühiku kohta, 24.11.2014. Toodud on otse faasisuurustest (A, B, C) ning pärijärgnevuskomponentidest (D+) leitud suurused ja modaalteisndusega leitud suurus (M+).



Joonis 2.14 Suhtelised vead mõõdetud liiniparameetrites, 3.09.2014. Viga on toodud aktiivtastuses mõõdetuna otseselt igast faasist (A, B, C) ja pärijärgnevussuurustest (D+) ning leitud modaalteisenduste abil (M+). Võrdluseks on toodud faasisuurustest otse mõõdetud induktiivtastuse ja mahtvusjuhtivuse vead kolme faasi keskmisena.



Joonis 2.15 Suhtelised vead mõõdetud liiniparameetrites, 24.11.2014. Viga on toodud aktiivtastuses mõõdetuna otseselt igast faasist (A, B, C) ja pärijärgnevussuurustest (D+) ning leitud modaalteisenduste abil (M+).

2.2.7. Analüüs ja järeldused

Kahe ajaperioodi mõõteandmetest on saadud tulemusi, millel on nii ühiseid jooni kui ka olulisi erinevusi. Esimese perioodi mõõtmistest ei ole ühegi meetodiga võimalik eraldada referentsväärtusele lähedast aktiivtakistust. Leitud induktiivtakistuse väärtused on võrdlussuurusele lähedased, aga neis toimuvad ajalised muutused, millele ei ole näiliselt otsest põhjust. Teise perioodi mõõteandmetest on modaalteisenduste abil võimalik leida küllaltki realistlik hinnang juhi aktiivtakistusele, samuti saab lähedase suuruse ühe faasi mõõtmistest. Induktiivtakistuse hinnangud on taaskord lähedased referentssuurusele ja antud juhul ilma esimeses perioodis nähtud suuremate ajaliste muutusteta.

Mõlemast ajaperioodist leitud mahtvusjuhtivuse väärtused on üldjoontes sarnased. Küll aga muutub esimese perioodi pärijärgnevussuurustest leitud mahtvusjuhtivuse väärtus erinevalt teiste meetoditega leitud väärtustest. Leitud aktiivjuhtivuse väärtused on kummaski perioodis üksteise suhtes sarnased, kuid teise perioodi puhul on kõik väärtused veidi suuremad. Arvestades vaadeldud päevade ilmastikutingimuste erinevusi (teine periood on lumesajusest päevast), võib eeldada, et antud erinevusest ilmnevad suuremad koroonakaod.

Saadud tulemused näitavad teatud probleeme taolise monitooringu teostatavuses. Mõõteandmetest ei saa igal ajahetkel leida väärtusi, mis oleks piisava täpsusega, et nende põhjal liini talitlust hinnata. Esitletud arvutuste puhul vähendab tulemuste täpsust tõenäoliselt liini madal koormatus. Kuna voolutrafode koormus jääb liini madala koormuse puhul kaugemale nende nimisuurustest, on nende vahendusel saadud mõõtmised ebatäpsed. Vaadeldud mõõtmiste kasutatavusele parema hinnangu saamiseks oleks oluline kasutada mõõteandmeid perioodist, mil liinil on suurem koormus. See vastaks ka lähedasemalt olukordadele, kui liini jälgimise täpsus on olulisem.

2.3. Ülekandekadude estimateerimine

Kui liini mõlemasse otsa on paigaldatud faasimõõtur, on võimalik liini otste võimsusvoogude vahest leida ülekandekaad. Antud juhul saab seda kirjeldada avaldisega

$$\underline{\Delta S} = \underline{S}_1 - \underline{S}_2 = \underline{U}_m(l)\underline{I}_m^*(l) - \underline{U}_m(0)\underline{I}_m^*(0), \quad (2.64)$$

kus * tähistab kaaskompleksarvu.

Teisalt avalduvad ülekandekadude erinevad komponendid järgmiselt

$$\Delta P_{Jm} = r_m \int_0^L |\underline{I}_m(l)|^2 dl \quad (2.65a)$$

$$\Delta P_{Cm} = g_m \int_0^L |\underline{U}_m(l)|^2 dl \quad (2.65b)$$

$$\Delta Q_{Im} = x_m \int_0^L |\underline{I}_m(l)|^2 dl \quad (2.65c)$$

$$\Delta Q_{Cm} = b_m \int_0^L |\underline{U}_m(l)|^2 dl \quad (2.65d)$$

kus r_m , g_m , x_m ja b_m on takistuse ja juhtivuse z_m ja y_m komponendid. (Need võrrandid on lahendatavad avaldisi (2.30) ja (2.31) numbriliselt integreerides.)

Komponentide summast avalduvad juba summaarsed ülekandekaod

$$\underline{\Delta S} = \Delta P_m + j\Delta Q_m, \quad (2.66)$$

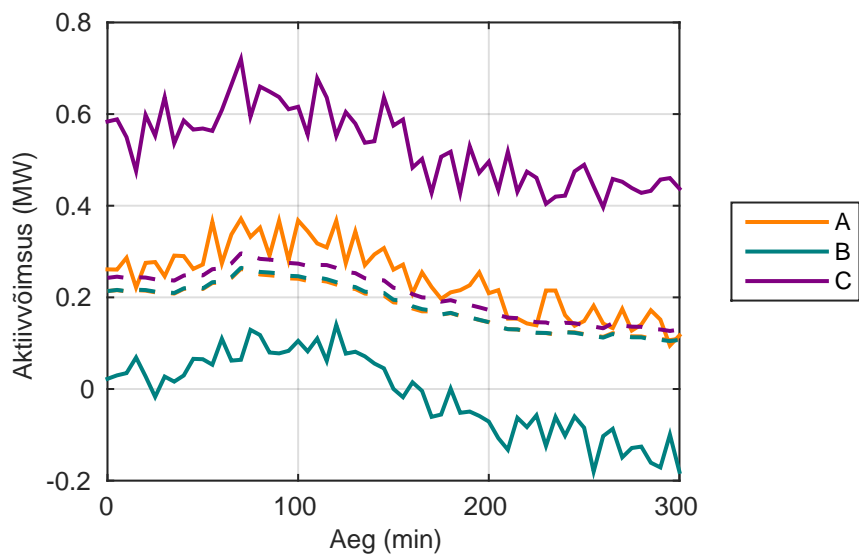
kus ΔP_m on $\pm\Delta P_{Jm}$ ja $\pm\Delta P_{Cm}$ summa ning ΔQ_m on $\pm\Delta Q_{Im}$ ja $\pm\Delta Q_{Cm}$ summa, arvestades võimsusvoogude suundi. Kui liiniparameetrid on arvatud faasimõõtmiste andmetest, on kadude avaldised (2.64) ja (2.66) ekvivalentsed.

Iga kaakomponent on lähedaselt seotud sellele vastava liinimudeli parameetriga. See aga tähendab, et kui teatud liiniparameetreid ei ole võimalik piisavalt täpselt mõõta, on oodata ebatäpsusi ka kadude estimateerimisel. Teisest küljest tähendab see, et erinevaid kaakomponente on võimalik eraldiseisvalt mõõta. Aktiivkadude puhul saab eraldi määrata soojuslikud ning koroonakaod, samal ajal saab eraldi leida ka liini induktiivsuses tarbitava ja mahtuvuses genereeritava reaktiivvõimsuse.

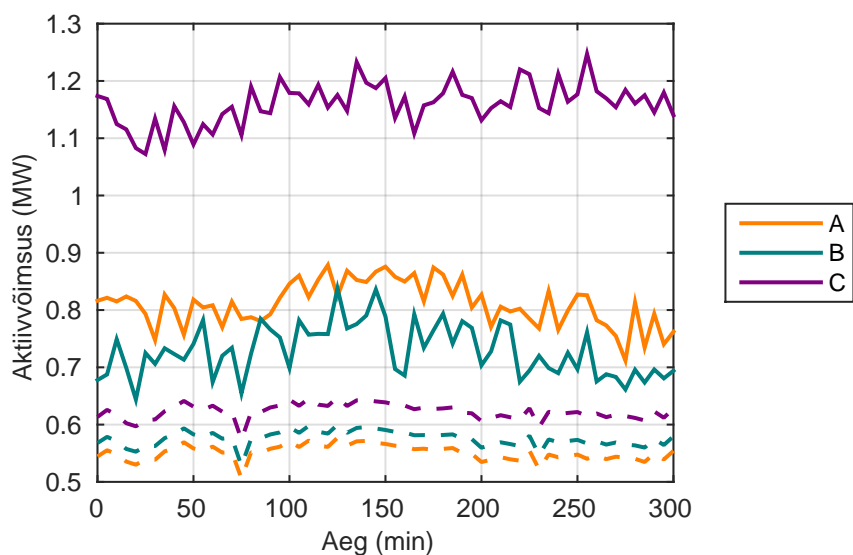
2.3.1. Arvutuslikud näited

Joonistel 2.16 ja 2.17 on toodud liini aktiivkaod faaside kaupa. Kaod on leitud nii mõõdetud võimsusvoogude vahedena (nagu (2.64)) kui ka arvatud mõõdetud voludest ja pingetest referentstakistuse alusel (nagu (2.65a)). Kuna põikaktiivjuhtivusel puudub referentsväärtus, on teisel juhul tegemist ainult soojuslike kadude hinnanguga ehk koroonakaod on jäetud arvestamata.

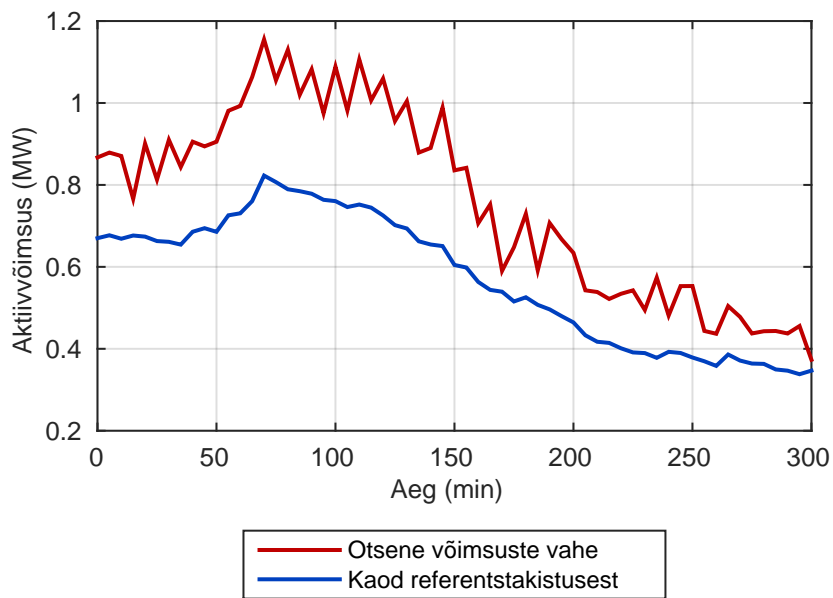
Joonistel 2.18 ja 2.19 on toodud liini aktiivvõimsuse summaarsed kaod, mis on leitud vastavate faasisuuruste summana. Taaskord on referentsparameetrist leitud ainult soojuslikud kaod.



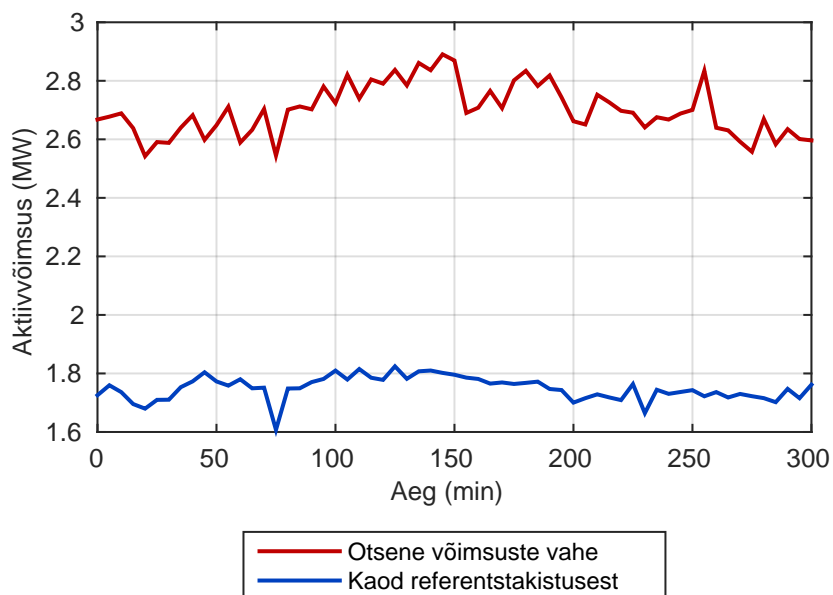
Joonis 2.16 Aktiivkaod liini faasides, 3.09.2014. Pidevad jooned tähistavad otseseid mõõtmisi, kriipsjooned aga aktiivtakistuse referentsväärtuse alusel faasimõõtmistest arvatud väärtusi.



Joonis 2.17 Aktiivkaod liini faasides, 21.11.2014. Pidevad jooned tähistavad otseseid mõõtmisi, kriipsjooned aga aktiivtakistuse referentsväärtuse alusel faasimõõtmistest arvatud väärtusi.

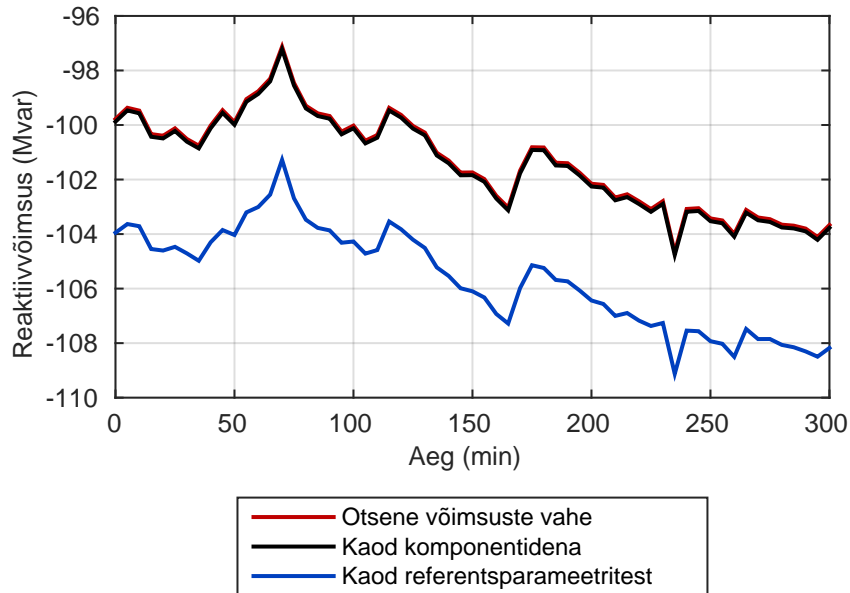


Joonis 2.18 Summaarsed aktiivkaod liinis, 3.09.2014. Võrreldud on otsest mõõtmist ja referentstakistuse alusel arvatatud tulemust.

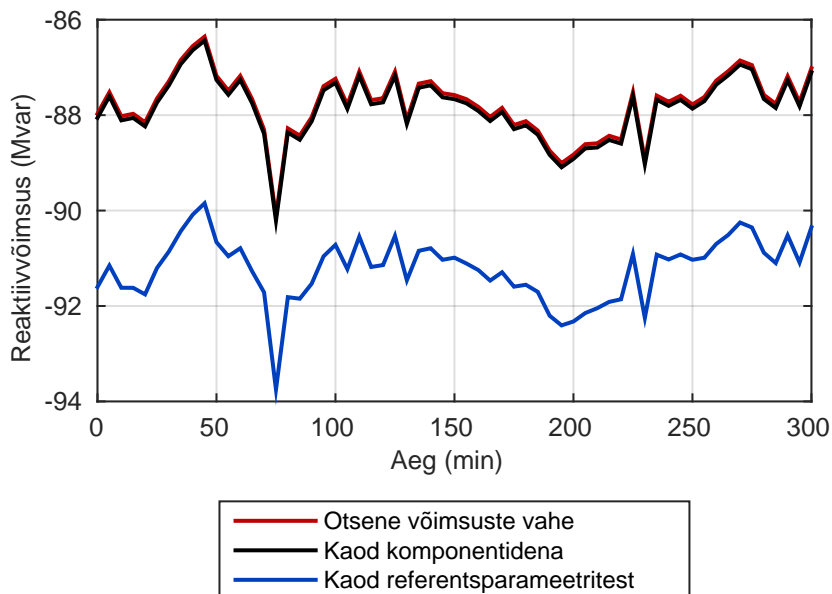


Joonis 2.19 Summaarsed aktiivkaod liinis, 21.11.2014. Võrreldud on otsest mõõtmist ja referentstakistuse alusel arvatatud tulemust.

Joonistel 2.20 ja 2.21 on toodud välja liini otste reaktiivvõimsuste vahe. Mõõteandmete alusel on vahe leitud nii võrrandist (2.64) kui ka (2.66). Lisaks on mõõdetud pingete ja voolude ning referentsinduktiivsuse ja -mahtuvuse alusel leitud võrranditest (2.65) vastavad komponendid.



Joonis 2.20 Summaarne reaktiivvõimsuste vahe liini kahe otsa vahel, 3.09.2014. Reaktiivkaod on leitud nii ainult otsesestest mõõtmistest kui ka referentstakistust ja -juhtivust kasutades.



Joonis 2.21 Summaarne reaktiivvõimsuste vahe liini kahe otsa vahel, 21.11.2014. Reaktiivkaod on leitud nii ainult otsesestest mõõtmistest kui ka referentstakistust ja -juhtivust kasutades.

2.3.2. Analüüs ja järeldused

Otseselt mõõdetud faaside aktiivkadudest on näha, et kadude mõõtmisel ilmnevad liiniparameetrite mõõtmisega sarnased probleemid. Esimese perioodi mõõteandmetest leitud kadudes on faaside vahel väga suured erinevused ning ühes faasis on ka negatiivse väärtusega kaod. Samas on näha, kuidas referentstakistuse alusel on võimalik saada küllaltki realistlikke hinnanguid. Teise perioodi puhul on samuti näha faasisuurustes suuri erinevusi, kuid üheski faasis ei ole leitud ebarealistlikke väärtusi. Siin ilmneb aga, et kõigi kolme faasi puhul ületavad otseselt mõõdetud kaod referentstakistuse alusel leitud väärtusi. Nagu eelnevalt mainitud, võib eeldada, et teisel perioodil on suuremad koroonakaod, mis seda erinevust seletaks.

Esimese perioodi summaarseid aktiivkadusid vaadeldes on näha, et otseselt mõõdetud ja referentstakistuse alusel arvatud väärtused on üksteisele lähedasemad. Võib eeldada, et siin on faasisuurustes esinevad süstemaatilised vead üksteise mõju osaliselt tühistanud. Teise perioodi mõõtmistes esineb otseselt mõõdetud ja referentstakistuse alusel leitud väärtustes suuremaid erinevusi. Antud juhul võib jällegi eeldada koroonakadude suurema osakaalu mõju.

Kui aktiivkadude puhul on näha, kuidas otseselt mõõdetud ja referentssuurustest hinnatud kaod muutuvad ajas veidi erinevalt, siis leitud reaktiivvõimsuste vahe muutub ajas mõlemal juhul ühetaoliselt. Taaskord on näha otseselt mõõdetud ja referentssuuruste alusel leitud kadudes teatud erinevust. Antud juhul võib erinevuse põhiliseks põhjuseks olla see, et mahtuvusjuhtivuse referentssuurus on arvutuslik, mitte mõõdetud. Siinkohal tasub ära märkida ka seda, et kadusid komponentidena leides on võimalik eraldi välja tuua liini poolt tarbitava ja toodetava reaktiivvõimsuse.

Kokkuvõttes ilmneb, et faasimõõtmistest on võimalik küllaltki paindlikult saada reaalarajateavet ülekandeliini kadude kohta. Küll aga on raske hinnata leitud väärtuste täpsust, eriti arvestades seda, et osades mõõteandmetest on saadud ebarealistlikke väärtusi. Taaskord on põhjust eeldada, et liini madala koormuse tõttu on mõõtmistes suuremad volutrafode põhjustatud vead. Kadude mõõtmise täpsuse paremaks hindamiseks oleks vaja arvutusi teostada suurema koormusega liini mõõteandmetest.

2.4. Faasimõõtmiste mõõtemääramatused

Kahe eelneva alapeatüki arvutustulemused näitasid, et kohati annavad faasimõõtmised ebarealistlikke ja suurte vigadega tulemusi. Käesolev peatükk üritab anda vastuse küsimustele, millest niivõrd suured mõõtemääramatused tulenevad ja kuidas neid hinnata. Selleks on uuritud teoreetiliselt faasimõõtmiste tulemuste liitmääramatusi ja on teostatud erinevaid näidisarvutusi, kus

on faasimõõtmistest leitud suurustele ka mõõtemääramatused välja arvatud.

Mõningate faasimõõturitel põhinevate hinnangute liitmääramatuse on teatud määral uuritud, [20, 21] kasutades tavalisi ühemõõtmeliste suuruste jaoks soovitatud põhimõtteid [22]. Samas on teada, et kahemõõtmelistel suurustel (nt faasorid), mille vead kummaski mõõtmes (nt kompleksarvu reaali- ja imaginaariosas) ei ole võrdsed, on soovitatav kasutada täiustatud lähenemist [23, 24, 25]. Lisaks sellele on faasimõõtmistest arvatud suuruste määramatuste käsitlemisel siiani jäetud arvestamata mõõtetetrafoode vigadega, eeldades et need on kalibratsiooniteguritega kõrvaldatud.

Käesolevas aruandes on välja pakutud faasimõõtmistest saadud suuruste määramatuste arvutamiseks meetod, mis põhineb kompleks suuruste liitmääramatuste arvutamise teoorial [24, 26]. Antud lähenemises arvestatakse mõõdetud suuruste liitmääramatuste leidmisel ka mõõtetetrafoode mõõtmisvigadega, st mõõtetetrafoode täiusliku kalibratsiooni eeldus on kõrvale jäetud, kuna see ei vasta tegelikele oludele. Mõõtemääramatuste leidmist vaadeldakse mitme faasimõõturitel põhineva rakenduse näitel.

2.4.1. Komplekssuuruste mõõtemääramatused

Faasimõõturid mõõdavad pingeid ja voole kompleks suurustena, (ehk kahemõõtmeliste suurustena) määramatustega nii amplituudi kui ka faasinurga mõõtmistes. Komplekssuuruste mõõtemääramatuste käsitlemisel on ühemõõtmeliste suurustega võrreldes mõned erisused, mis on järjekorras kokku võetud.

Olgu vaatluse all kompleks suurus \underline{x} , millele saadakse mõõtmisest hinnang \underline{x}

$$\underline{x} = x_{re} + jx_{im},$$

kus reaali- ja imaginaariosa on tähistatud vastavate indeksitega. Hinnangu \underline{x} kovariatsioonimaatriks antakse kujul

$$\mathbf{V}(\underline{x}) = \begin{bmatrix} u(x_{re})^2 & u(x_{re})ru(x_{im}) \\ u(x_{im})ru(x_{re}) & u(x_{im})^2 \end{bmatrix}, \quad (2.67)$$

kus $u(x)$ tähistab suuruse x määramatust ning $r = r[u(x_{re}), u(x_{im})] = r[u(x_{im}), u(x_{re})]$ on korrelatsioon reaali- ja imaginaariosade määramatuste vahel [24].

Suurus \underline{x} , mida mõõdetakse amplituudi x_m ja nurga x_ϕ kujul

$$\underline{x} = x_m e^{jx_\phi},$$

teisendatakse polaarkoordinaatidest ristkoordinaatides kompleksstasandile. Kõigepealt leitakse määramatuse tangentsiaalkomponent [27]

$$u(x_t) = x_m \tan [u(x_\phi)]. \quad (2.68)$$

Seejärel moodustatakse radiaal-tangentsiaalne kovariatsioonimaatriks

$$\mathbf{V}_t(\underline{x}) = \begin{bmatrix} u(x_m)^2 & u(x_m)r_t u(x_t) \\ u(x_t)r_t u(x_m) & u(x_t)^2 \end{bmatrix}, \quad (2.69)$$

kus $r_t \cong r[u(x_m), u(x_\phi)]$ on korrelatsioon amplituudi ja faasinurga mõõtemääramatuste vahel [27]. Järgnevalt pööratakse maatriksit mõõdetud nurga võrra

$$\Phi = \begin{bmatrix} \cos x_\phi & -\sin x_\phi \\ \sin x_\phi & \cos x_\phi \end{bmatrix}. \quad (2.70)$$

Sellisel leitakse suuruse kovariatsioonimaatriks kompleksstasandil [27]

$$\mathbf{V}(\underline{x}) = \Phi \mathbf{V}_t(\underline{x}) \Phi^\top. \quad (2.71)$$

Mingi suuruse \underline{Y} hindamist n suuruse $\underline{X}_1, \underline{X}_2, \dots, \underline{X}_n$ mõõtmiste alusel võib tähistada järgmiselt [26]

$$\underline{Y} = f(\underline{X}_1, \underline{X}_2, \dots, \underline{X}_n). \quad (2.72)$$

Suuruse \underline{Y} hinnang avaldub siis

$$\underline{y} = f(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (2.73)$$

Hinnatud suuruse \underline{y} kovariatsioonimaatriks arvutatakse järgnevalt [24]

$$\mathbf{V}(\underline{y}) = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \mathbf{W}(\underline{x}_k) \mathbf{R}(\underline{x}_k, \underline{x}_l) \mathbf{W}(\underline{x}_l)^\top, \quad (2.74)$$

kus

$$\begin{aligned} \mathbf{W}(\underline{x}_k) &= \mathbf{J}_y(\underline{x}_k) \mathbf{U}(\underline{x}_k) \\ &= \begin{bmatrix} \frac{\partial y_{re}}{\partial x_{kre}} & \frac{\partial y_{re}}{\partial x_{kim}} \\ \frac{\partial y_{im}}{\partial x_{kre}} & \frac{\partial y_{im}}{\partial x_{kim}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(x_{kre}) & 0 \\ 0 & u(x_{kim}) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.75)$$

ja

$$\mathbf{R}(\underline{x}_k, \underline{x}_l) = \begin{bmatrix} r[u(x_{kre}), u(x_{lre})] & r[u(x_{kre}), u(x_{lim})] \\ r[u(x_{kim}), u(x_{lre})] & r[u(x_{kim}), u(x_{lim})] \end{bmatrix}, \quad (2.76)$$

milles sisaldub teave suuruste \underline{x}_k ja \underline{x}_l määramatuste korrelatsiooni kohta.

Jakobiaanide leidmist võib lihtsustada järgnev omadus [24]

$$\frac{\partial y}{\partial \underline{x}} = \underline{z} \Rightarrow \mathbf{J}_y(\underline{x}) = \begin{bmatrix} z_{re} & -z_{im} \\ z_{im} & z_{re} \end{bmatrix}. \quad (2.77)$$

2.4.2. Võimsusvoog liini otsas

Pinge ja voolu faasoritest avaldub võimsusvoog liini ühes otsas järgnevalt

$$\underline{S} = \underline{U}\underline{I}^*, \quad (2.78)$$

kus $*$ tähistab kaaskompleksi. Võimsusvoo hinnang on sel juhul

$$\underline{s} = \underline{u}\underline{i}^* = u_{re}i_{re} + u_{im}i_{im} - ju_{re}i_{im} + ju_{im}i_{re}. \quad (2.79)$$

Pinge ja voolu amplituudi mõõtmiste määramatud leitakse mõõdetud suuruse ning mõõtetrafodest ja faasimõõturitest põhjustatud suhtelise liitvea korrutisena ja faasinurga määramatud nurgavigade liitveana [22]

$$u(u_m) = u_m \sqrt{[\varepsilon_{rVT}]^2 + [\varepsilon_{uPMU}]^2}, \quad (2.80a)$$

$$u(i_m) = i_m \sqrt{[\varepsilon_{rCT}(i_m)]^2 + [\varepsilon_{cPMU}]^2}, \quad (2.80b)$$

$$u(u_\phi) = \sqrt{[\varepsilon_{pVT}]^2 + [\varepsilon_{pPMU}]^2}, \quad (2.80c)$$

$$u(i_\phi) = \sqrt{[\varepsilon_{pCT}(i_m)]^2 + [\varepsilon_{pPMU}]^2}, \quad (2.80d)$$

kus ε_{rVT} ja ε_{rCT} on amplituudi- (ehk keeru-) ning ε_{pVT} ja ε_{pCT} nurgavead pinge- ja voolu- trafodes vastavalt nende täpsusklassidele; ε_{uPMU} , ε_{cPMU} ja ε_{pPMU} tähistavad pinge, voolu ja faasinurga mõõteviga faasimõõturis. Soovi korral saab vigade usaldusvahemikku muuta neid vastavate teguritega läbi korrutades [26]. Seejärel teisendatakse arvutatud määramatud kompleksstasandile võrrandite (2.68)–(2.71) järgi, eeldusel et amplituudi ja faasinurga mõõtmised on sõltumatud ($r_t = 0$).

Mõõtetrafo nurgaviga sõltub primaarvoolust, nii et antud korrelatsiooni puudumise eeldus on lihtsustus. Kuna tegemist on tugevalt mittelineaarse sõltuvusega ning selle kohta ei ole üldjuhul andmeid saada, ei ole siinkohal sellist korrelatsioonikordajat leitud. Voolutrafo täpsusklassis on antud amplituudi- ja nurgaviga vastavalt primaarvoolu ja nimivoolu suhtele ja seega võetakse mõlema suuruse väärtused vastavalt mõõdetud pingeamplituudile.

Ka pinge- ja voolumõõtmised loetakse sõltumatuteks, st korrelatsioonikordajad nende suuruste määramatuste vahel on nullid

$$r[u(u_{re}), u(i_{re})] = 0, \quad \text{etc.}$$

Seega leidub ainult kaks nullist erinevat korrelatsioonimaatriksit

$$\mathbf{R}(\underline{u}) = \begin{bmatrix} 1 & r[u(u_{re}), u(u_{im})] \\ r[u(u_{im}), u(u_{re})] & 1 \end{bmatrix} \quad (2.81)$$

ning ekvivalentne voolu hinnangu i jaoks. Määramatuste maatriksid moodustatakse järgmiselt

$$\mathbf{U}(\underline{u}) = \begin{bmatrix} u(u_{re}) & 0 \\ 0 & u(u_{im}) \end{bmatrix} \quad (2.82)$$

ja taaskord sarnane voolu hinnangule i .

Nende nelja maatriksi elemendid on leitavad maatriksitest $\mathbf{V}(\underline{u})$ ja $\mathbf{V}(i)$

$$u(u_{re}) = \sqrt{V_{11}(\underline{u})}, \quad (2.83)$$

$$u(u_{im}) = \sqrt{V_{22}(\underline{u})}, \quad (2.84)$$

$$r(u_{re}, u_{im}) = \frac{V_{12}(\underline{u})}{u(u_{re})u(u_{im})}, \quad (2.85)$$

kus indeksid tähistavad maatriksi elementi rea ja tulba järgi.

Jakobiaanid leitakse järgmiselt

$$\mathbf{J}_s(\underline{u}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial s_{re}}{\partial u_{re}} & \frac{\partial s_{re}}{\partial u_{im}} \\ \frac{\partial s_{im}}{\partial u_{re}} & \frac{\partial s_{im}}{\partial u_{im}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{re} & i_{im} \\ -i_{im} & i_{re} \end{bmatrix}, \quad (2.86)$$

$$\mathbf{J}_s(i) = \begin{bmatrix} \frac{\partial s_{re}}{\partial i_{re}} & \frac{\partial s_{re}}{\partial i_{im}} \\ \frac{\partial s_{im}}{\partial i_{re}} & \frac{\partial s_{im}}{\partial i_{im}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{re} & u_{im} \\ u_{im} & -u_{re} \end{bmatrix}, \quad (2.87)$$

nii et võimsuse hinnangu \underline{s} kovariatsioonimaatriks avaldub

$$\begin{aligned} \mathbf{V}(\underline{s}) &= \mathbf{J}_s(\underline{u})\mathbf{U}(\underline{u})\mathbf{R}(\underline{u})[\mathbf{J}_s(\underline{u})\mathbf{U}(\underline{u})]^\top \\ &+ \mathbf{J}_s(\underline{i})\mathbf{U}(\underline{i})\mathbf{R}(\underline{i})[\mathbf{J}_s(\underline{i})\mathbf{U}(\underline{i})]^\top, \end{aligned} \quad (2.88)$$

millest võib leida reaali- ja imaginaariosade ehk aktiiv- ning reaktiivvõimsuse mõõtemääramatused.

2.4.3. Ülekandekaod liinis

Võimsuse mõõtmist ühes liini otsas võib küllaltki lihtsalt laiendada kadude arvutamiseks, mis seisneb liini kahe otsa võimsuste vahe leidmises

$$\underline{\Delta S} = \underline{S}_1 - \underline{S}_2 = \underline{U}_1 \underline{I}_1^* - \underline{U}_2 \underline{I}_2^*, \quad (2.89)$$

mille hinnanguks on

$$\begin{aligned} \underline{\Delta s} &= \underline{u}_1 \underline{i}_1^* - \underline{u}_2 \underline{i}_2^* \\ &= u_{1\text{re}} i_{1\text{re}} + u_{1\text{im}} i_{1\text{im}} - j u_{1\text{re}} i_{1\text{im}} + j u_{1\text{im}} i_{1\text{re}} \\ &\quad - u_{2\text{re}} i_{2\text{re}} - u_{2\text{im}} i_{2\text{im}} + j u_{2\text{re}} i_{2\text{im}} - j u_{2\text{im}} i_{2\text{re}}. \end{aligned} \quad (2.90)$$

Võrranditega (2.80)–(2.85) kirjeldatud protseduuri saab sarnaselt rakendada määramatuste ja korrelatsioonide maatriksite $\mathbf{U}(\underline{u}_1)$, $\mathbf{R}(\underline{u}_1)$ jne leidmiseks suurustele \underline{u}_1 , \underline{u}_2 , \underline{i}_1 ja \underline{i}_2 . Võrrandites (2.86) ja (2.87) antud jakobiaane saab kasutada, võttes $\mathbf{J}_{\Delta s}(\underline{u}_1) = \mathbf{J}_s(\underline{u})$ ja $\mathbf{J}_{\Delta s}(\underline{i}_1) = \mathbf{J}_s(\underline{i})$. Puuduvad jakobiaanid avalduvad järgmiselt

$$\mathbf{J}_{\Delta s}(\underline{u}_2) = \begin{bmatrix} -i_{2\text{re}} & -i_{2\text{im}} \\ i_{2\text{im}} & -i_{2\text{re}} \end{bmatrix}, \quad (2.91)$$

$$\mathbf{J}_{\Delta s}(\underline{i}_2) = \begin{bmatrix} -u_{2\text{re}} & -u_{2\text{im}} \\ -u_{2\text{im}} & u_{2\text{re}} \end{bmatrix}. \quad (2.92)$$

Aktiiv- ja reaktiivkadude määramatused $u(\Delta s_{\text{re}})$ ning $u(\Delta s_{\text{im}})$ saab eraldada järgmisest kova-

riatsioonimaatriksist

$$\begin{aligned}
\mathbf{V}(\underline{\Delta s}) &= \mathbf{J}_{\Delta s}(u_1)\mathbf{U}(u_1)\mathbf{R}(u_1) [\mathbf{J}_{\Delta s}(u_1)\mathbf{U}(u_1)]^\top \\
&+ \mathbf{J}_{\Delta s}(i_1)\mathbf{U}(i_1)\mathbf{R}(i_1) [\mathbf{J}_{\Delta s}(i_1)\mathbf{U}(i_1)]^\top \\
&+ \mathbf{J}_{\Delta s}(u_2)\mathbf{U}(u_2)\mathbf{R}(u_2) [\mathbf{J}_{\Delta s}(u_2)\mathbf{U}(u_2)]^\top \\
&+ \mathbf{J}_{\Delta s}(i_2)\mathbf{U}(i_2)\mathbf{R}(i_2) [\mathbf{J}_{\Delta s}(i_2)\mathbf{U}(i_2)]^\top .
\end{aligned} \tag{2.93}$$

2.4.4. Liiniparameetrite lihtsustatud hinnang

Kui rakendada liini parameetrite mõõtmisel lihtsustust, et juhtide omavahelise sidestatuse võib arvestamata jätta, saab pikitakistuse ja põikjuhtivuse leida järgmiselt

$$\underline{z} = \underline{\gamma} \underline{z}_c, \tag{2.94}$$

$$\underline{y} = \frac{\underline{\gamma}}{\underline{z}_c}, \tag{2.95}$$

kus

$$\underline{\gamma} = \frac{\operatorname{arcosh}(\underline{a})}{l}, \tag{2.96}$$

$$\underline{z}_c = \frac{\underline{u}_2 \sqrt{(\underline{a}-1)(\underline{a}+1)}}{i_1 - i_2 \underline{a}}, \tag{2.97}$$

$$\underline{a} \equiv \frac{\underline{b}}{\underline{c}} \equiv \frac{\underline{u}_1 i_1 + \underline{u}_2 i_2}{\underline{u}_2 i_1 + \underline{u}_1 i_2}.$$

Suurused \underline{a} , \underline{b} ja \underline{c} on kasutusele võetud avaldiste lihtsustamiseks.

Taaskord saab pinget ja voolu mõõtemääramatusi käsitleda võrranditega (2.80)–(2.85). Seega jääb järgi veel jakobiaanide avaldamine, mida saab teha järgmiselt

$$\forall x \in \{u_1, u_2, i_1, i_2\} :$$

$$\frac{\partial \underline{z}}{\partial x} = \underline{z}_c \frac{\partial \underline{\gamma}}{\partial x} + \underline{\gamma} \frac{\partial \underline{z}_c}{\partial x}, \tag{2.98}$$

$$\frac{\partial \underline{y}}{\partial x} = \frac{1}{\underline{z}_c} \frac{\partial \underline{\gamma}}{\partial x} - \frac{\underline{\gamma}}{\underline{z}_c^2} \frac{\partial \underline{z}_c}{\partial x}, \tag{2.99}$$

$$\frac{\partial \underline{\gamma}}{\partial x} = \frac{\partial \underline{a} / \partial x}{l \sqrt{(\underline{a}-1)(\underline{a}+1)}}, \tag{2.100}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \underline{z}_c}{\partial x} &= \frac{\underline{u}_2 \underline{a} (\partial \underline{a} / \partial x) + (\partial \underline{u}_2 / \partial x) (\underline{a}-1)(\underline{a}+1)}{\sqrt{(\underline{a}-1)(\underline{a}+1)} (i_1 - i_2 \underline{a})} \\
&- \frac{\underline{u}_2 \sqrt{(\underline{a}-1)(\underline{a}+1)}}{(i_1 - i_2 \underline{a})^2} \left(\frac{\partial i_1}{\partial x} - \underline{a} \frac{\partial i_2}{\partial x} - i_2 \frac{\partial \underline{a}}{\partial x} \right),
\end{aligned} \tag{2.101}$$

$$\frac{\partial \underline{a}}{\partial \underline{x}} = \frac{1}{\underline{c}^2} \left(\underline{c} \frac{\partial \underline{b}}{\partial \underline{x}} - \underline{b} \frac{\partial \underline{c}}{\partial \underline{x}} \right), \quad (2.102)$$

kus tuletised mõõdetud suuruste järgi on

$$\frac{\partial \underline{b}}{\partial u_1} = i_1, \quad \frac{\partial \underline{c}}{\partial u_1} = i_2, \quad (2.103a,b)$$

$$\frac{\partial \underline{b}}{\partial u_2} = i_2, \quad \frac{\partial \underline{c}}{\partial u_2} = i_1, \quad (2.103c,d)$$

$$\frac{\partial \underline{b}}{\partial i_1} = u_1, \quad \frac{\partial \underline{c}}{\partial i_1} = u_2, \quad (2.103e,f)$$

$$\frac{\partial \underline{b}}{\partial i_2} = u_2, \quad \frac{\partial \underline{c}}{\partial i_2} = u_1. \quad (2.103g,h)$$

Jakobiaanid on leitud võrrandis (2.77) kirjeldatud omadusest

$$\forall \underline{x} \in \{u_1, u_2, i_1, i_2\} :$$

$$\mathbf{J}_z(\underline{x}) = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial z}{\partial \underline{x}} \right)_{\text{re}} & - \left(\frac{\partial z}{\partial \underline{x}} \right)_{\text{im}} \\ \left(\frac{\partial z}{\partial \underline{x}} \right)_{\text{im}} & \left(\frac{\partial z}{\partial \underline{x}} \right)_{\text{re}} \end{bmatrix}, \quad (2.104)$$

$$\mathbf{J}_y(\underline{x}) = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial y}{\partial \underline{x}} \right)_{\text{re}} & - \left(\frac{\partial y}{\partial \underline{x}} \right)_{\text{im}} \\ \left(\frac{\partial y}{\partial \underline{x}} \right)_{\text{im}} & \left(\frac{\partial y}{\partial \underline{x}} \right)_{\text{re}} \end{bmatrix}. \quad (2.105)$$

Sellest võib leida kovariatsioonimaatriksid

$$\mathbf{V}(z) = \sum_{\underline{x} \in \{u_1, u_2, i_1, i_2\}} \mathbf{J}_z(\underline{x}) \mathbf{U}(\underline{x}) \mathbf{R}(\underline{x}) [\mathbf{J}_z(\underline{x}) \mathbf{U}(\underline{x})]^\top, \quad (2.106)$$

$$\mathbf{V}(y) = \sum_{\underline{x} \in \{u_1, u_2, i_1, i_2\}} \mathbf{J}_y(\underline{x}) \mathbf{U}(\underline{x}) \mathbf{R}(\underline{x}) [\mathbf{J}_y(\underline{x}) \mathbf{U}(\underline{x})]^\top, \quad (2.107)$$

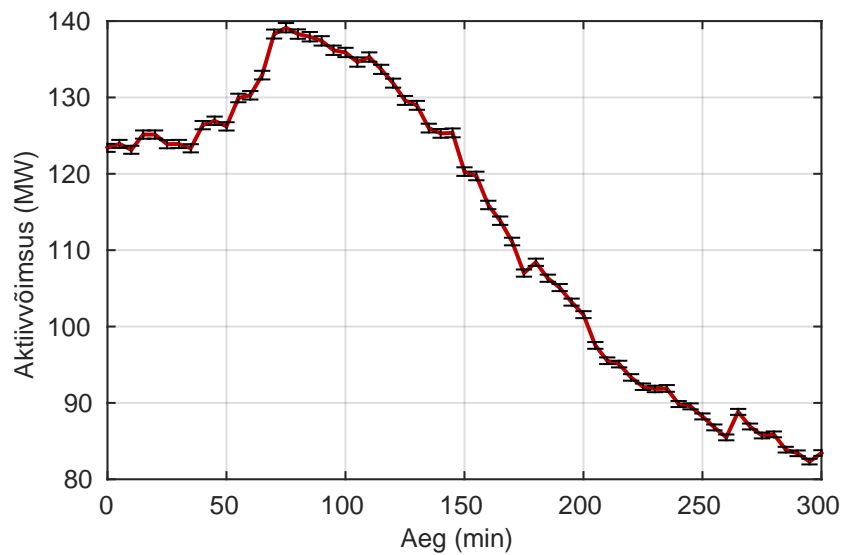
mis sisaldavad teavet takistuse ja juhtivuse hinnangute mõõtemääramatustest $u(z_{\text{re}})$, $u(z_{\text{im}})$, $u(y_{\text{re}})$ ja $u(y_{\text{im}})$.

2.4.5. Arvutuslikud näited

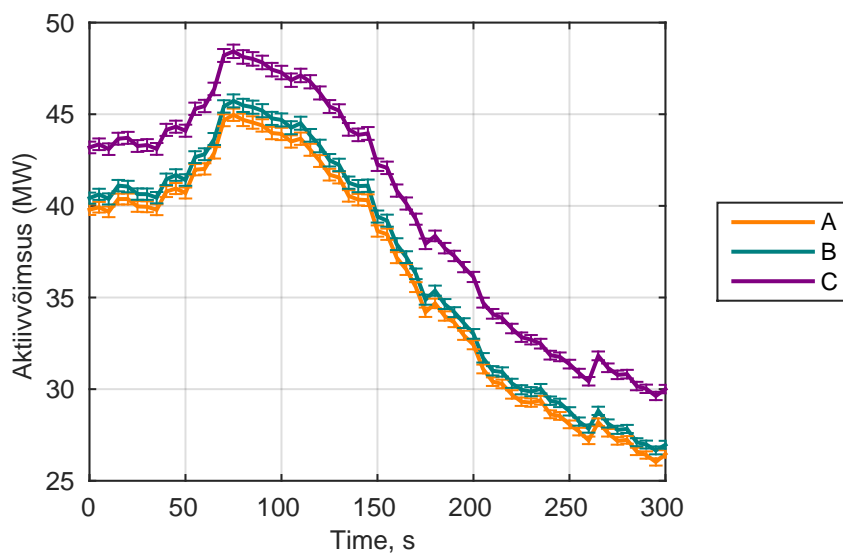
Liini L511 mõõtmiste põhjal on tehtud mõned arvutused eelnevalt kirjeldatud teooria näitlikustamiseks ja selle kasutatavuse analüüsimiseks. Kõik järgnevad arvutused on tehtud mõõtmistest ajavahemikus 03.09.2014 16:39:03–03.09.2014 21:39:03 5-minutilise sammuga. Mõõteseadmete vead on võetud nende andmetest ning on kasutatud 3σ usaldusvahemikku.

Esimeseks vaadeldavaks suuruseks on võimsusvoog liini ühes otsas. Arvutatud on summaarne võimsus, faaside võimsused ning suuruste mõõtemääramatused vastavalt alajaotusele 2.4.2.

Joonisel 2.22 on toodud summaarne võimsus ning joonisel 2.23 võimsus faaside kaupa.



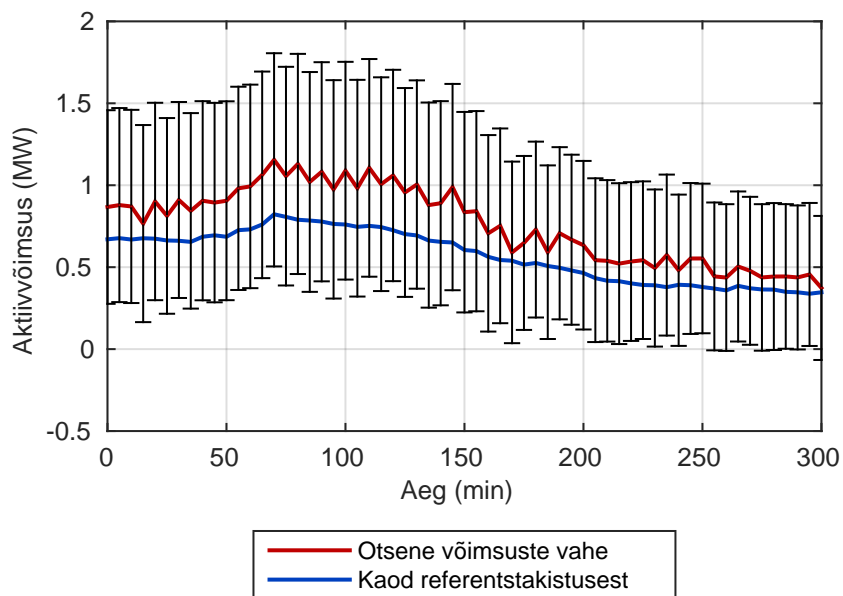
Joonis 2.22 Summaarne võimsus liini L511 Balti AJ poolses otsas.



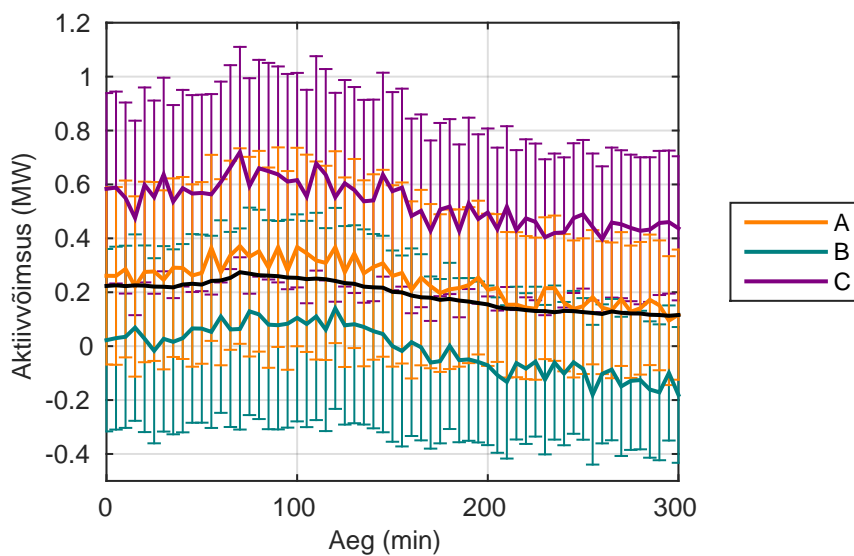
Joonis 2.23 Faaside võimsused liini L511 Balti AJ poolses otsas.

Järgmisena on vaadeldud aktiivvõimsuse kadude mõõtmist liini ulatuses vastavalt alajaotusele 2.4.3. Taaskord on eraldi vaadeldud kogukadusid ning kadusid faasides. Lisaks sellele on võrdluseks toodud sarnaselt eelmise alapeatükiga referentstakistusest leitud kaod. Joonisel 2.24 on toodud summaarsed aktiivkaod ning joonisel 2.25 kaod faaside kaupa.

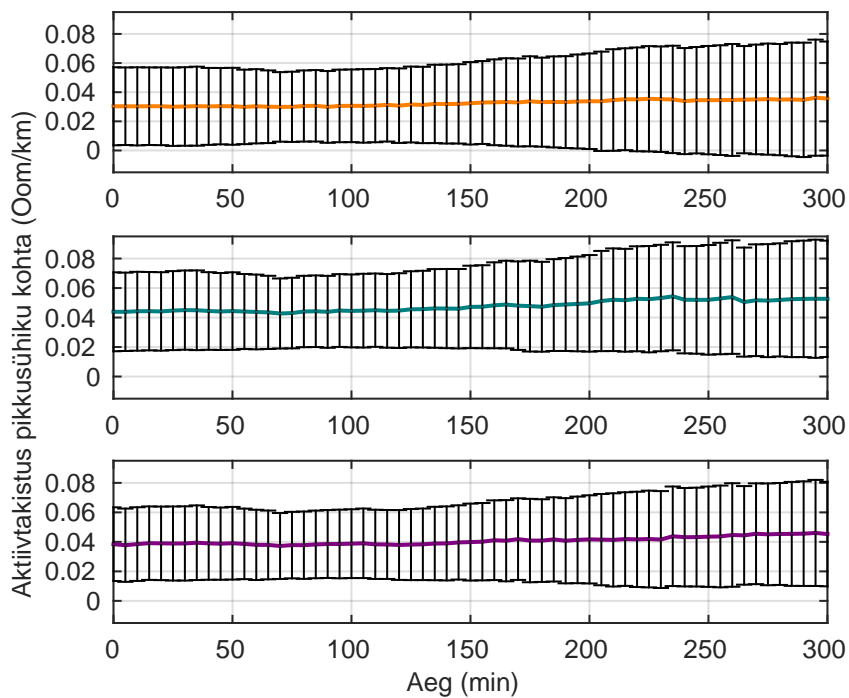
Viimaseks on faasimõõtmistest arvatatud liiniparameetrid alajaotuses 2.4.4 vaadeldud lihtsusstatud meetodiga. Joonistel 2.26–2.29 on toodud faaside pikitakistuste ning põikjuhtivuste komponendid ning nende mõõtemääramatused.



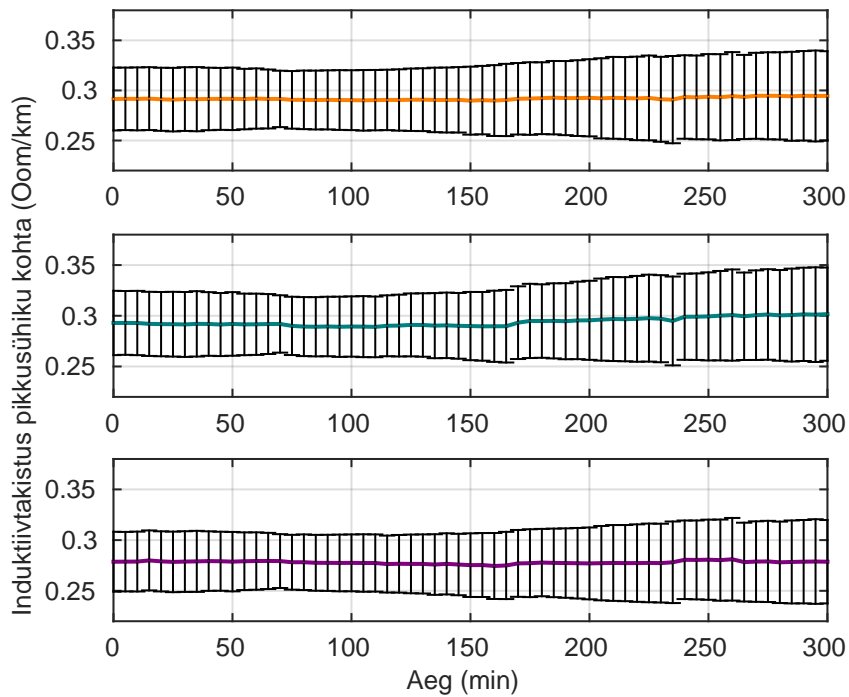
Joonis 2.24 Summaarsed aktiivvõimsuse kaod liinis L511.



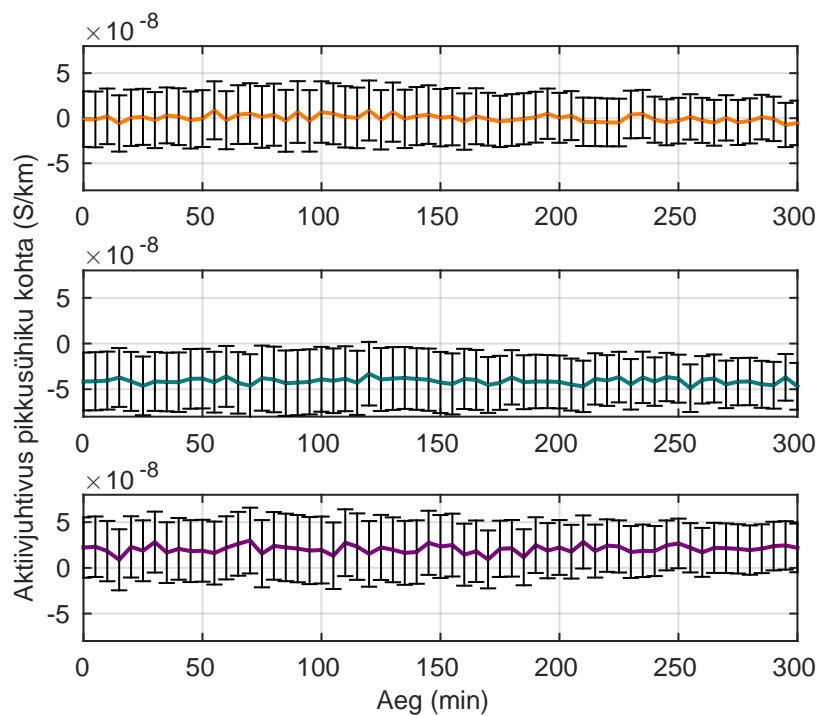
Joonis 2.25 Faaside aktiivvõimsuse kaod liinis L511. Musta joonega on toodud referentstakistuse alusel hinnatud kaod.



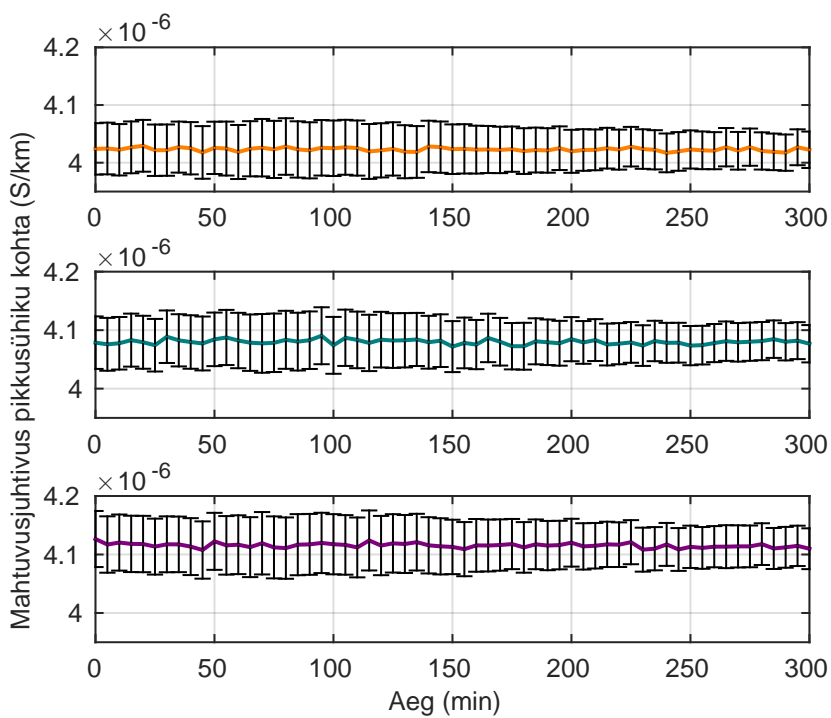
Joonis 2.26 Liini L511 mõõdetud aktiivtakistus.



Joonis 2.27 Liini L511 mõõdetud induktiivtakistus.



Joonis 2.28 Liini L511 mõõdetud aktiivjuhtivus.



Joonis 2.29 Liini L511 mõõdetud mahtuvusjuhtivus.

2.4.6. Analüüs ja järeldused

Faasimõõtmiste liitmääramatuste hindamist on kõigepealt vaadeldud liini ühe otsa võimsusvoo näitel. Tulemustest on näha, et nii faaside kui ka summaarse võimsusvoo mõõtmise määramatus on väike. Võib eeldada, et faasimõõturite abil on võimalik küllaltki suure täpsusega jälgida võimsvooge ülekandesüsteemis.

Vaadeldes ülekandekadusid ehk liini kahe otsa võimsusvoogude vahet, ilmnevad suuremad mõõtemääramatused. Kuna ülekandekaod on liini otste võimsusvoogudest oluliselt väiksemad, on ka mõistetav, miks kadude määramisel suhteline määramatus oluliselt suurem on. Sellised tulemused on mõistetavad ka eelmise alapeatüki tulemusi arvestades ja aitavad seal ilmnunud probleeme selgitada. Kadude hindamisel on näha, kuidas suuremate mõõdetud väärtuste korral esinevad ka suuremad mõõtemääramatused, samas tähendab see seda, et suhteline määramatus on siiski pigem püsiva suurusega.

Liiniparameetrite mõõtemääramatusi on samuti huvitav vaadelda eelmise alapeatüki tulemusi arvestades. Nii nagu seal esimese perioodi jaoks leitud aktiivtakistuse suhtelised vead, on ka siin aktiivtakistuse mõõtemääramatused kohati sama suured kui mõõdetavad suurused ise. Samuti ilmnevad pigem küllaltki väiksed mõõtemääramatused induktiivtakistuse ja mahtuvusjuhtivuse hindamisel. Oluline on siinjuures ka see, et kuigi suurused muutuvad ajas küllaltki vähe, muutub nende mõõtemääramatus sarnaselt liini koormusega. Ajavahemikus, mil on suurem koormus, on pikitakistuse komponentide määramatus väiksem, samas on põikjuhtivuse komponentide määramatus suurem.

Käesolevas alapeatükis uuritud mõõtemääramatused aitavad analüüsida eelmistes alapeatükides ilmnunud raskusi mõne suuruse mõõtmisel. Kuna faasimõõturite mõõtevead on suurusjärgu võrra väiksemad kui mõõtetrafode mõõtevead, võib järeldada et just viimastest on antud probleemid põhjustatud. Ka käesoleva alapeatüki tulemused viitavad sellele, et faasimõõturite abil liini jälgimise võimaluste paremaks mõistmiseks on vaja teha täiendavaid arvutusi suurema koormusega liini mõõtmiste põhjal.

2.5. Kokkuvõte

Käesolev peatükk käsitles faasimõõturite abil liinide monitoorimise erinevaid aspekte. Põhiliseks eesmärgiks oli uurida liinide läbilaskevõime ja ülekandekadude dünaamilist jälgimist.

Esimene alapeatükk demonstreeris projekti eelmises etapis vaadeldud meteoroloogilistel mõõtmistel põhineva liini temperatuuri jälgimise meetodi rakendatavust. Kuna ilmamõõtmiste andmeid oli võimalik saada ainult tunniajaste vahede tagant, vaadeldi staatilist soojusbilanssi ja

liini koormust mõõdeti mitmeminutilise sammuga. Antud lahendus näitas, et selline meetod on kasutatav, aga ei toonud otseselt välja faasimõõturitest saadavate reaalamõõtmiste eeliseid. Lisaks ei olnud andmeid, millega saadud tulemusi võrrelda.

Tulevikus tuleks antud meetodit läbi proovida väiksema sammuga ilmamõõtmistega ja võrrelda tulemusi referentsväärtustega. Ajaliselt tihedamalt mõõdetud meteoroloogiliste andmetega võiks kasutada väiksema sammuga koormuse andmeid, mis juhul annaks ka faasimõõtmiste andmete kasutamine suurema eelise.

Järgmisena käsitleti aruandes liini mõlema otsa faasimõõtmistest liiniparameetrite määramist. Vaadeldud rakendusel oleks kaks potentsiaalset kasutust: liini parameetrite alusel arvutatud temperatuuri ning kadude jälgimine reaalamajas. Liini mõlemas otsas mõõdetud faasoritest liini parameetrite arvutamist on varem teatud määral teoreetiliselt käsitletud, kuid see käsitlus ei ole olnud päris täielik ning meetodeid ei ole reaalseste mõõtmiste puhul edukalt demonstreeritud. Lisaks vaadeldi ka liini kummaski otsas mõõdetud võimsusvoogude vahest ülekandekadude määramist.

Aruandes esitleti vaadeldud meetodite põhjal tehtud näidisarvutusi. Ilmnes, et nii parameetrite kui ka kadude määramisel esineb teatud ebatäpsusi. Kadusid oli võimalik mõõta, kuid teatud faasisuurustes esines väärtusi, mis tulemuste usaldusväärsuse kahtluse alla seadsid. Liini aktiivtakistust ei õnnestunud piisavalt täpselt mõõta, et selle alusel liini temperatuuri määrata. Samas andis kahe erineva ajaperioodi mõõtmiste võrdlus põhjust oletada, et mõõtmiste täpsus suureneb liini koormuse kasvades. Selliseid liinide jälgimise meetodeid tuleks edasi uurida suurema koormusega liini mõõteandmete alusel.

Peatüki viimane osa käsitles vaadeldud rakenduste mõõtemääramatuste hindamist. Lisaks sellele, et väljatöötatud lähenemist saab faasimõõtmiste rakendustes kasutada, aitas see ka selgitada mõõtmiste ebatäpsusi. Suurused, mille väärtustes oli suuri vigu, olid ka suurte mõõtemääramatustega. Kinnitada saab ka oletusi, et mõõtetrafode mõõtmisvead kutsuvad ilmnenu vigu esile ning et teatud suuruste mõõtmistäpsus kasvab liini suuremal koormamisel.

2.6. Kirjandus

- [1] “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.
- [2] “Thermal behaviour of overhead conductors,” Cigre working group 22.12 report, August 2002.

- [3] “Eesti elektrisüsteemi laiseiresüsteemi arendamine ja analüüs (WAMPAC),” TTÜ elektroenergeetika instituudi uurimustöö 1.1-4/13/232 / Lep13118 I etapi aruanne, 2014.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] J. B. Anderson, Ed., *Analysis of Faulted Power Systems*. IEEE-Wiley, 1973.
- [12] J. R. Carson, “Wave propagation in overhead wires with ground return,” *Bell System Technical Journal*, vol. 5, pp. 539–554, 1926.
- [13] 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.

- [14] J. B. Faria and J. B. Mendez, “Modal analysis of untransposed bilateral three-phase lines—a perturbation approach,” *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 12, no. 1, pp. 497–504, Jan 1997.
- [15] H. Dommel and W.Š. Meyer, “Computation of electromagnetic transients,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 62, no. 7, pp. 983–993, July 1974.
- [16] A. Budner, “Introduction of frequency-dependent line parameters into an electromagnetic transients program,” *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. 89, no. 1, pp. 88–97, Jan 1970.
- [17] M. Farzaneh, S. Farokhi, and W. Chisholm, *Electrical Design of Overhead Power Transmission Lines*. McGraw-Hill, 2012.
- [18] “Increased power flow guidebook,” Electric Power Research Institute, Tech. Rep. 1010627, 2005.
- [19] D. Hedman, “Theoretical evaluation of multiphase propagation,” *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. PAS-90, no. 6, pp. 2460–2471, Nov 1971.
- [20] S. Chakrabarti and E. Kyriakides, “PMU measurement uncertainty considerations in WLS state estimation,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 24, no. 2, pp. 1062–1071, May 2009.
- [21] S. Chakrabarti, E. Kyriakides, and M. Albu, “Uncertainty in power system state variables obtained through synchronized measurements,” *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 58, no. 8, pp. 2452–2458, Aug 2009.
- [22] JCGM, “Evaluation of measurement data — guide to the expression of uncertainty in measurement,” Guide JCGM 100:2008, 2008.
- [23] N. M. Ridler and M. J. Salter, “An approach to the treatment of uncertainty in complex S-parameter measurements,” *Metrologia*, vol. 39, no. 3, pp. 295–302, 2002.
- [24] B. D. Hall, “On the propagation of uncertainty in complex-valued quantities,” *Metrologia*, vol. 41, no. 3, pp. 173–177, 2004.
- [25] JCGM, “Evaluation of measurement data — supplement 2 to the “guide to the expression of uncertainty in measurement” — extension to any number of output quantities,” Guide JCGM 102:2011, 2011.

- [26] B. D. Hall, “Notes on complex measurement uncertainty – part 2,” Industrial Research Limited, Tech. Rep. IRL 2557, 2012.
- [27] —, “Some considerations related to the evaluation of measurement uncertainty for complex-valued quantities in radio frequency measurements,” *Metrologia*, vol. 44, no. 6, pp. L62–L67, 2007.

3. Elektrisüsteemi laiseire ja selle optimeerimine

Arvestades hetkel olemasolevad faasimõõtureid, uuritakse süsteemi oleku mõõtmise võimalikust ja täpsust. Aruandes võrreldakse faasimõõtmiste ja estimaatori tulemusi. Vaatluse all on sõlmed, kuhu on mõne liini otsa paigaldatud faasimõõtur või mis on ühendatud haruga, mille teises otsas on faasimõõtur. Analüüsitakse nii pinge amplituudide ja nurkade kui ka liinide võimsusvoogude mõõtmist. Lisaks uuritakse võimsusvoogude estimateerimist harudes, millele pole faasimõõturit paigaldatud, aga mille mõlema otsa sõlmest on mõne teise faasimõõturi vahendusel olemas pingete mõõteandmed.

Käesoleva R&D projekti eelmises osas vaadeldi faasimõõturite paigutamise optimeerimise probleemi üldisel tasemel ning leiti PMU-de optimaalsed asukohad alajaamades arvestades süsteemi jälgitavust. Antud lahenduses vaadeldi faasimõõturite paigutuse probleemi klassikalist püstitust, kus eeldatakse, et iga PMU mõõdab kõigi sõlmega seotud harude voolusid. Kuna praegu paigaldavad faasimõõturid seda reaalselt ei võimalda, on käesolevas aruandes vaadeldud PMU-de optimaalset paigutamist harude kaupa ehk eeldusel, et iga PMU mõõdab teatud sõlmes teatud haru ühte otsa.

Täiendavalt vaadeldakse aruandes faasimõõturite paigaldamise optimeerimist ka teiste tingimuste alusel, oleku ja kadude estimateerimise seisukohast. Lisaks normaaltalitlusele analüüsitakse optimaalset paigutust arvestades N-1 ja N-2 kriteeriumeid. Lisaks sõlmede jälgitavuse kriteeriumitele tuuakse sisse lisatingimused, millega saab paigutust optimeerida ka liinide jälgitavuse seisukohast. Väljatöötatud meetodiga leitakse optimaalsed lahendused Eesti 330 kV süsteemi jälgitavaks muutmiseks, arvestades erinevaid lisatingimusi.

3.1. Oleku estimateerimine ja faasimõõtmised

Kui tavapäraselt leitakse süsteemi sõlmede pinged ja nurgad ning liinide võimsusvood süsteemi oleku estimaatorist, siis faasimõõturid ja laiseiresüsteem võimaldavad selliste suuruste otsest mõõtmist. Käesolevas alapeatükis vaadeldakse nende suuruste leidmist, mida on võimalik arvutada olemasoleva 11 faasimõõturi andmetest.

Kõigepealt vaadeldakse olemasolevate faasimõõturite vahetuid mõõtmisi ja võrreldakse nende mõõdetud pingeamplituude ja -nurki ning võimsusvooge vastavate estimaatorist saadud väärtustega. Järgmisena leitakse riigisiseste liinide jaoks ühe otsa mõõteandmete alusel teise otsa pinged ja voolud. Viimasena uuritakse, kas on võimalik harude koormusi estimateerida ainult sõlmede pingefaasorite alusel. Antud juhul vaadeldakse liine, millele pole paigaldatud faasimõõtureid, aga mille mõlema otsa sõlmest väljub mõni teine liin, mille faasimõõtur mõõdab

selle sõlme pinget.

3.1.1. Arvutuslikud näited

Faasimõõtmistest hinnatud suurusi on võrreldud estimaatori andmetega ajahetkest 24.11.2014 11:49:40. Sealjuures on faasimõõtmiste andmed võetud vahemikus üks sekund enne ja pärast seda hetke ning väärtused keskmistatud.

Antud ajavahemikus oli liin 301 (Tartu–Läti) väljas, seega vastavad andmed puuduvad ja on kasutatud ülejäänud kümne faasimõõtmise mõõteandmeid. Riikidevaheliste vahelduvvooluühenduste puhul ei ole estimaatori väljundandmetes liini võimsusvoogu välja toodud ning seetõttu on nende väärtusteks võetud vastavate sõlmede *mismatch* väärtused.

Nurkade võrdlemiseks on valitud üks sõlm (Eesti EJ) baassõlmeks, mille pingenurga väärtuseks on eeldatud null ja kõik teised nurgad selle suhtes arvutatud. Kuna antud sõlmes on kaks faasimõõturit, on nullnurgaks võetud Venemaale mineva liini otsas mõõdetud pinge nurk.

Suurused, mis ei ole otseselt mõõdetud, on leitud peatükis 2 kirjeldatud lihtsustatud meetoditega. Sellised arvutused eeldavad liiniparameetrite teadmist võimalikult suure täpsusega. Kui mõne liini jaoks on need suurused mõõdetud, siis teiste liinide kohta on teada ainult ligikaudsed väärtused, millel on mõju tulemuste täpsusele. Antud arvutustes on kasutatud hetkel olemasolevaid andmeid, mis on välja toodud tabelis 3.1.

Tabel 3.1 Kasutatud liiniparameetrid.

Liin	r (Ω/km)	x (Ω/km)	b (10^{-6} S/km)	l (km)
L511	0,02426	0,2945	12,71	209
L353	0,04	0,321	11,19	243
L505	0,02397	0,3001	12,73	18,8
L364	0,02397	0,3001	12,73	57,3
L504	0,02448	0,2775	16,01	49,1
L359	0,02397	0,3001	12,73	68,0
L351	0,032	0,318	11,30	21,8
L300	0,04	0,321	11,19	168

Esimesena on vaadeldud faasimõõturitega otseselt mõõdetavaid suurusi harude otstes. Tabelis 3.2 on toodud pingefaasorite ja tabelis 3.3 võimsusvoogude mõõtmiste tulemused. Võrdluseks on toodud samade suuruste väärtused estimaatorist ning leitud nende suhtes absoluutsed ja suhtelised vead.

Tabel 3.2 Mõõdetud pingefaasorid süsteemi sõlmedes (nurgad sõlme Eesti (L373) suhtes).

	Aruküla (L511)		Balti (L374)		Balti (L511)		Eesti (L353)	
	U_m (pu)	φ (°)	U_m (pu)	φ (°)	U_m (pu)	φ (°)	U_m (pu)	φ (°)
Faasimõõtur	1,071	-5,234	1,077	-0,4626	1,076	-0,4928	1,071	-0,0818
Estimaator	1,072	-5,164	1,075	-0,4363	1,075	-0,4363	1,074	0
Abs. viga	0,0009	0,0704	0,0026	0,0263	0,0017	0,0565	0,0030	0,0818
Suht. viga (%)	0,0831	1,363	0,2464	6,032	0,1539	12,94	0,2759	–
	Eesti (L373)		Harku (EST1)		Harku (L505)		Püssi (EST2)	
	U_m (pu)	φ (°)	U_m (pu)	φ (°)	U_m (pu)	φ (°)	U_m (pu)	φ (°)
Faasimõõtur	1,070	0	1,073	-5,403	1,073	-5,456	1,072	-0,3752
Estimaator	1,074	0	1,072	-5,283	1,072	-5,283	1,074	-0,3082
Abs. viga	0,0046	–	0,0009	0,1204	0,0012	0,1730	0,0025	0,0670
Suht. viga (%)	0,4265	–	0,0814	2,278	0,1078	3,275	0,2302	21,75
	Püssi (L364)		Tartu (L358)					
	U_m (pu)	φ (°)	U_m (pu)	φ (°)				
Faasimõõtur	1,074	-0,3205	1,071	-7,013				
Estimaator	1,075	-0,3082	1,072	-7,099				
Abs. viga	0,0005	0,0123	0,0010	0,0859				
Suht. viga (%)	0,0491	3,977	0,0932	1,210				

Tabel 3.3 Mõõdetud aktiivvõimsuse (MW) ja reaktiivvõimsuse (Mvar) vood liinide otstes.

	Aruküla→Balti		Balti→Vene		Balti→Aruküla		Eesti→Tsirguliina	
	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q
Faasimõõtur	173,0	37,20	-20,50	-5,192	174,6	-56,02	509,1	-26,83
Estimaator	166,7	37,10	-6,900	-6,300	167,8	-54,00	507,0	-23,50
Abs. viga	6,253	0,1005	13,60	1,108	6,808	2,017	2,069	3,331
Suht. viga (%)	3,751	0,2709	197,2	17,59	4,057	3,734	0,4082	14,17
	Eesti→Vene		Harku→Soome		Harku→Kiisa		Püssi→Soome	
	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q
Faasimõõtur	134,8	2,718	-0,2464	43,28	117,57	6,861	335,6	20,60
Estimaator	137,6	6,600	-2,500	43,60	119,40	4,800	335,5	17,60
Abs. viga	2,776	3,882	2,254	0,3194	1,829	2,061	0,1426	2,998
Suht. viga (%)	2,017	58,81	90,15	0,7326	1,532	42,93	0,0425	17,03
	Püssi→Eesti		Tartu→Vene					
	P	Q	P	Q				
Faasimõõtur	41,85	2,934	-109,5	30,07				
Estimaator	41,70	6,000	-109,4	30,50				
Abs. viga	0,1503	3,066	0,0820	0,4306				
Suht. viga (%)	0,3605	51,11	0,0750	1,412				

Seejärel on iga faasimõõturiga varustatud riigisisese liini jaoks ühe otsa mõõteandmetest arvatud teise otsa pingefaasorid ja võimsusvood. Selliselt leitud hinnangud sõlmede pingetele on toodud tabelis 3.4 ja liini otste võimsusvoogudele tabelis 3.5.

Tabel 3.4 Liini teise otsa faasimõõtmistest estimeeritud pingefaasorid süsteemi sõlmedes (nurgad sõlme Eesti (L373) suhtes).

	Balti (L511)		Aruküla (L511)		Tsirguliina (L353)	
	U_m (pu)	φ (°)	U_m (pu)	φ (°)	U_m (pu)	φ (°)
Faasimõõtmised	1,073	-0,1224	1,073	-5,141	1,064	-18,06
Estimaator	1,075	-0,4363	1,072	-5,164	1,067	-19,10
Abs. viga	0,0021	0,3139	0,0009	0,0229	0,0033	1,038
Suht. viga (%)	0,1926	71,96	0,0845	0,4429	0,3139	5,437
	Kiisa (L505)		Eesti (L364)			
	U_m (pu)	φ (°)	U_m (pu)	φ (°)		
Faasimõõtmised	1,074	-4,933	1,073	0,2551		
Estimaator	1,072	-5,021	1,074	0		
Abs. viga	0,0013	0,0887	0,0011	0,2551		
Suht. viga (%)	0,1195	1,766	0,1035	–		

Tabel 3.5 Liini teise otsa faasimõõtmistest estimeeritud aktiivvõimsuse (MW) ja reaktiivvõimsuse (Mvar) vood liinide otstes.

	Balti→Aruküla		Aruküla→Balti		Tsirguliina→Eesti	
	P	Q	P	Q	P	Q
Faasimõõtmised	174,2	-59,26	173,4	41,05	489,2	-74,22
Estimaator	167,8	-54,00	166,7	37,10	486,4	-80,50
Abs. viga	6,403	5,259	6,661	3,95	2,824	6,285
Suht. viga (%)	3,816	9,739	3,996	10,65	0,581	7,807
	Kiisa→Harku		Eesti→Püssi			
	P	Q	P	Q		
Faasimõõtmised	117,6	-2,525	41,87	-27,32		
Estimaator	119,5	-5,600	41,70	-23,30		
Abs. viga	1,880	3,075	0,1724	4,023		
Suht. viga (%)	1,573	54,91	0,4133	17,27		

Viimasena on vaadeldud võimalust faasimõõtmiste abil estimeerida võimsusvooge ja kadusid liinidel, millel pole faasimõõtureid. Selliste liinide jaoks, mis ühendavad sõlmi, mille pingefaasorid on mõõdetud teiste liinide otstest, on ainult pingemõõtmiste alusel leitud võimsusvood ja kaod toodud tabelites 3.6 ja 3.7.

Tabel 3.6 Pingefaasoritest estimateeritud aktiivvõimsuse (MW) ja reaktiivvõimsuse (Mvar) vood liinide otstes.

	Aruküla→Balti		Balti→Aruküla		Harku→Aruküla		Aruküla→Harku	
	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q
Faasimõõtmised	-169,6	-45,88	170,8	-51,71	-29,47	5,090	29,48	-37,74
Estimaator	-166,7	-37,10	167,8	-54,00	-18,70	-8,500	18,70	-17,00
Abs. viga	2,868	8,783	2,961	2,287	10,77	13,59	10,78	20,74
Suht. viga (%)	1,720	23,67	1,764	4,235	57,57	> 100	57,65	> 100
	Balti→Püssi		Püssi→Balti		Eesti→Balti		Balti→Eesti	
	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q
Faasimõõtmised	-14,10	2,521	14,11	-38,74	125,2	-125,0	-125,0	116,5
Estimaator	-14,90	-17,50	14,90	-17,50	141,6	-27,90	-141,5	18,90
Abs. viga	0,8032	20,02	0,7934	21,24	16,41	97,12	16,48	97,57
Suht. viga (%)	5,391	> 100	5,325	> 100	11,59	≫ 100	11,65	≫ 100
	Balti→Tartu		Tartu→Balti					
	P	Q	P	Q				
Faasimõõtmised	276,9	1116	-202,5	-565,1				
Estimaator	265,2	-48,60	-261,6	2,300				
Abs. viga	11,69	1165	59,13	567,4				
Suht. viga (%)	4,406	≫ 100	22,60	≫ 100				

Tabel 3.7 Pingefaasoritest estimateeritud aktiivvõimsuse (MW) ja reaktiivvõimsuse (Mvar) kaod liinidel.

	L511 Aruküla–Balti		L504 Harku–Aruküla		L359 Balti–Püssi	
	P	Q	P	Q	P	Q
Faasimõõtmised	1,193	-97,60	0,0138	-32,65	0,0098	-36,22
Estimaator	1,100	-91,10	0	-25,5	0	-35,00
Abs. viga	0,0929	6,496	0,0138	7,147	0,0098	1,217
Suht. viga (%)	8,445	7,130	–	28,03	–	3,477
	L351 Eesti–Balti		L300 Balti–Tartu			
	P	Q	P	Q		
Faasimõõtmised	0,1734	-8,557	74,41	551,0		
Estimaator	0,1000	-9,000	3,600	-46,30		
Abs. viga	0,0734	0,4423	70,81	597,3		
Suht. viga (%)	73,38	4,919	≫ 100	≫ 100		

3.1.2. Analüüs ja järeldused

Näidisarvutustes vaadeldi kõigepealt suurus, mida on hetkel paigaldatud faasimõõturitega võimalik otseselt mõõta. Saadud väärtusi võrreldi vastavate väärtusega süsteemi oleku estimaatorist. Tulemustest on näha, et pingete otseste mõõtmistega probleeme ei ole: kõigi mõõdetud pingeamplituudide vead jäävad alla poole protsendi ja nurkade vead jäävad alla $0,2^\circ$. Võimsusvoogude mõõtmisel esineb estimaatori tulemustega võrreldes veidi suuremaid vigu. Siinkohal tasub aga ära märkida, et kui mõne suuruse suhteline viga on ligi 50%, siis absoluutsed vead jäävad mõne MW ja Mvar suurusjärku.

Järgmisena vaadeldi liini ühest otsast teise otsa pingete ja võimsusvoogude estimateerimist. Kui taoliselt leitud pingeamplituudide vead on endiselt väikesed, siis nurkade hinnangutes on estimaatori tulemustega võrreldes veidi suuremaid erinevusi. Samas jääb ka suurim nurga mõõtmise viga 1° ligi, mis on antud juhul viieprotsendiline viga. Võimsusvoogude hinnangutes on näha sarnaseid vigu kui otsestes mõõtmistes.

Viimastes näidisarvutustes on uuritud võimalust kasutada sõlmede pingefaasorite mõõtmiste andmeid, et jälgida liine, millel pole faasimõõtureid. Ainult pingefaasoritest arvatud võimsusvood on küllaltki varieeruva kvaliteediga. Mõnel liinil oli võimalik saada võrdlemisi täpseid hinnanguid, kuid teiste liinide jaoks leiti ka väga suurte vigadega väärtusi. Samas ilmneb, et andmed on paremini kasutatavad liinide kadude hindamiseks. Sellest võib järeldada, et võimsusvoogude hinnangutes on n-ö samasuunalised vead, mis vahe leidmisel üksteise mõju osaliselt tühistavad. Vigade põhjuseks on tõenäoliselt liiniparameetrite ebatäpsus. Seda toetab ka asjaolu, et kõige paremad hinnangud saadi liinil 511, mille kohta olid olemas mõõdetud parameetrid, mitte arvutuslikud väärtused.

Kokkuvõttes võib järeldada, et piisava arvu faasimõõturitega on võimalik süsteemi olekut mõõta ja saada estimaatoriga võrreldava kvaliteediga väärtusi. Sealjuures on näha, et teatud määral on võimalik jälgida ka selliste liinide talitlust, millele pole kumbagi otsa faasimõõturit paigaldatud, kuid see eeldab küllaltki täpset teavet liiniparameetrite kohta.

3.2. Faasimõõturite optimaalne paigutus

Faasimõõturite optimaalset paigaldust on kirjanduses väga laialdaselt käsitletud. Üldjuhul on aga kõik lahendused põhinenud eeldusel, et iga teatud sõlme paigutatud faasimõõtur on võimeline mõõtma kõigi selle sõlmega seotud harude voolusid. Praegu paigaldatavad seadmed on piiratud sisendite arvuga ja võimaldavad üldjuhul mõõta lisaks sõlme pingele ühe-kahe seotud haru voolusid. Siiski leidub üksikuid publikatsioone, milles on vaadeldud piiratud sisendite arvuga

faasimõõturite või üksiku haruga seotud faasimõõturite paigutuse optimeerimist [1, 2, 3, 4].

Käesolevas aruandes on võetud aluseks nn haru PMU-de optimaalne paigutus ja seda edasi arendatud. Antud lahenduses eeldatakse, et faasimõõturid on seotud ühe haruga (liiniga) ehk mõõdavad pinget ja voolu konkreetse liini ühes otsas. Lahendust on täiendatud, nii et see arvestaks harude erinevate otstega, võimaldaks määrata vajalikud sõlmede jälgitavuse liiasuse tingimused ning määrata liinide jälgitavuse tingimusi.

3.2.1. Optimaalse paigutuse ülesanne

Kui arvestada eelnevalt kirjeldatud haru PMU-dega, saab optimeerimisülesande püstitada järgmiselt [1]

$$\min \sum_{j=1}^L c_j x_j \quad (3.1)$$

lisatingimusel

$$\begin{aligned} \forall i \in \{1, 2, \dots, N\} : \\ \sum_{j=1}^L T_{ij} x_j \geq 1, \end{aligned} \quad (3.2)$$

kus N on sõlmede arv, L harude arv ja c_j PMU paigaldamise kulukus haru j . Järguga $N \times L$ maatriks \mathbf{T} sisaldab võrgu topoloogiat: selle element T_{ij} on üks, kui sõlm i on seotud haruga j , ja null, kui vastav sõlm ja haru ei ole seotud. Vektori \mathbf{x} element x_j on binaarne muutuja, mis tähistab otsust harusse paigaldada faasimõõtur, kui selle väärtus on üks, ja jätta see paigaldamata, kui väärtus on null. Antud juhul vähendatakse kogukulusid tagamaks tingimus, et kõik sõlmed on jälgitavad [1].

Sellise optimeerimisülesande lahenduses on ära määratud harud, millele faasimõõturid paigaldades on terve võrk jälgitav, kuid ei ole määratletud, kummas liini otsas mõõteseadet olema peaks. Jälgitavuse definitsioonis on tehtud eeldus, et haru ühe otsa mõõtmistest on võimalik arvutada pinge ja voolu faasorid haru teises otsas. Seega võib faasimõõturi paigutada ükskõik kumba haru otsa või langetada valik muudel kaalutlustel, näiteks parema täpsusklassiga mõõtetrafosid eelistades.

Selleks, et arvestada $N-1$ ja $N-2$ kriteeriumidega, võib muuta optimeerimise lisatingimust, nii

et see on [5]

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, N\} : \quad (3.3)$$

$$\sum_{j=1}^L T_{ij} x_j \geq r_i + 1,$$

kus r_i on sõlme jälgitavuse liiasus. Antud vektori elemendi i väärtuseks määratakse üks, kui antud sõlme jälgitavus peab vastama $N-1$ kriteeriumile, ja kaks, kui on vaja tagada $N-2$ kriteerium. Seda tehes peab arvestama, et kui sõlm on teistega ühendatud läbi ühe haru, ei saa $N-1$ tagada; samamoodi ei saa kahe haruga sõlme jaoks tagada $N-2$ kriteeriumi.

Eleringi 330 kV võrgu sõlmede-harude ühenduste maatriksi võib koostada järgmiselt

$$\mathbf{T} = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{L504} & \text{L505} & \text{L506} & \text{L360} & \text{L357} & \text{L356} & \text{L364} & \text{L359} & \text{L351} & \text{L300} & \text{L511} & \text{L507} & \text{L346} & \text{L353} \end{matrix} \\ \left[\begin{array}{cccccccccccc} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right. & \begin{matrix} \text{Harku} \\ \text{Aruküla} \\ \text{Rakvere} \\ \text{Püssi} \\ \text{Kiisa} \\ \text{Eesti} \\ \text{Paide} \\ \text{Balti} \\ \text{Sindi} \\ \text{Tartu} \\ \text{Tsirguliina} \end{matrix} \end{matrix} \quad (3.4)$$

mille iga rea elementide summa näitab ära ka selle, mitme haruga antud sõlm ühendatud on.

Optimeerimisülesannet võib täiendada arvestades faasimõõtureid, mis on praeguseks juba paigaldatud või mille paigaldamine on ära otsustatud. Sellisel juhul tähistab x ainult täiendavalt vajalikke faasimõõtureid ja lisatingimuse võib püstitada kujul

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, N\} : \quad (3.5)$$

$$\sum_{j=1}^L T_{ij} (x_j + p_j) \geq r_i + 1,$$

kus p_j väärtuseks on üks, kui harusse j on juba paigaldatud faasimõõtur, ja null, kui see puudub.

Antud N–1 ja N–2 liiasuse kriteeriume võib vaadelda kahte moodi: faasimõõturi või liini rikke seisukohast. Eeltoodud püstitused eeldasid seda, et igale harule paigaldatakse vajadusel üksainus faasimõõtur, nii et liiasus on tagatud kas liini või faasimõõturi väljalangemisel. Kui vaadelda liiasust ainult faasimõõturi rikete seisukohast, võib neid paigaldada haru kohta kaks, näiteks liini kumbagi otsa.

Sellisel juhul on võimalik ülesanne püstitada järgmiselt

$$\min \sum_{j=1}^L c'_j x'_j + c''_j x''_j, \quad (3.6)$$

lisatingimusel

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, N\} : \quad (3.7)$$

$$\sum_{j=1}^L T_{ij}(x'_j + x''_j + p'_j + p''_j) \geq r_i + 1,$$

kus c'_j ja c''_j on PMU paigaldamise kulukus haru j kummaski otsas, x'_j ja x''_j on binaarsed muutujad, mis tähistavad otsust haru kummassegi otsa paigaldada PMU ning p'_j ja p''_j määravad ära, mitu faasimõõturit on harus j juba eelnevalt olemas. Kuludes c'_j ja c''_j on võimalik määrata erinev faasimõõturi paigaldamise maksumus haru kummagi otsa jaoks; samuti võib nende kulude kaudu määrata muid eelistusi (näiteks taaskord mõõtetrafode täpsus).

Käesolevas aruandes on arvestatud faasimõõturi olemasolu ja juba planeeritud paigaldamisega harudes järgmiselt

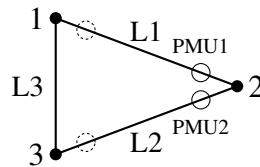
$$\begin{array}{c} \mathbf{(p')}^T = \\ \mathbf{(p'')}^T = \end{array} \begin{array}{c} \text{L504} \\ \text{L505} \\ \text{L506} \\ \text{L360} \\ \text{L357} \\ \text{L356} \\ \text{L364} \\ \text{L359} \\ \text{L351} \\ \text{L300} \\ \text{L511} \\ \text{L507} \\ \text{L346} \\ \text{L353} \end{array} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Antud seisus ilmneb tehest $\mathbf{T}(\mathbf{p}' + \mathbf{p}'')$, et kõik sõlmed peale Rakvere saavad lähiajal faasimõõturi abil jälgitavaks.

3.2.2. Harude jälgitavus

Lisaks süsteemi sõlmede pingefaasorite jälgimisele on faasimõõturid olulised ka liinide jälgimiseks. Selleks, et seda optimeerimisel arvestada, on kasutusele võetud haru jälgitavuse mõiste, mille alusel on võimalik tagada teatud arv otseseid mõõtmisi iga ülekandeliini kohta.

Faasimõõturitele asukohti valides tekkivad olukorrad, kus kahe liini algustesse paigaldatud PMUd teevad liinide lõppudes olevad sõlmed jälgitavaks. Kui neid kahte sõlme ei mõõda faasimõõturid teistel harudel ning neid ühendab omavahel kolmas haru, siis selle kolmanda haru kohta puuduvad otsesed mõõtmised. Olukorda saaks aga parandada, kui liigutada faasimõõtur sama haru teise otsa. Joonisel 3.1 on toodud näide, kus kaks faasimõõturit, tähistatud ringidega, muudavad kõik kolm sõlme jälgitavaks. Kui PMUd liigutada harude L1 ja L2 teistesse otstesse (tähistatud kriipsjoonega ringidega), on mõlema haruga L3 seotud sõlme pinge mõõdetav. Samuti on mõõtepunktid süsteemis ühtlasemalt laiali jaotatud.



Joonis 3.1 Näide sellest, kuidas sõlmede jälgimiseks optimaalseks osutunud harudele tegelike faasimõõturite paigaldamine mõjutab liinide otsesest jälgitavust.

Sisendites on selleks vaja teha üks muudatus: eraldada sõlmede ja harude ühenduste maatriks kahte osasse, nii et

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}' + \mathbf{T}'', \quad (3.9)$$

kus T'_{ij} on üks sõlme i ja haru j jaoks, kui x'_j vastab otsusele paigaldada faasimõõtur haru j sellesse otsa, kus on sõlm i . Kui haru 1 ühendab sõlmed 2 ja 3, siis $T'_{21} = 1$ ja $T'_{31} = 0$, kui x'_1 tähistab PMU paigaldamist harule 1 sõlme 2.

Otseselt jälgitavad sõlmed on leitavad järgmiselt

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, N\} : \quad \sum_{j=1}^L T'_{ij} x'_j + T''_{ij} x''_j \quad (3.10)$$

ehk

$$\mathbf{T}' \mathbf{x}' + \mathbf{T}'' \mathbf{x}'', \quad (3.11)$$

mis on N -elemendiline vektor, mille iga element määrab ära, kas sellele vastav sõlm on otseselt mõõdetav. See on oluline, sest konkreetse haru kohta käivad otsesed pingefaasorite mõõtmised saab leida järgmiselt

$$(\mathbf{T}' \mathbf{x}' + \mathbf{T}'' \mathbf{x}'')^\top \mathbf{T}, \quad (3.12)$$

mis sisaldab harule paigaldatud PMU-de ja haruga ühendatud teistele harudele paigutatud faasimõõturite asukohti.

simõõturite mõõtmisi.

Haru kummagi otsa kohta eraldi annavad sama tulemuse võrrandid

$$(\mathbf{T}'\mathbf{x}' + \mathbf{T}''\mathbf{x}'')^\top \mathbf{T}' \quad (3.13)$$

$$(\mathbf{T}'\mathbf{x}' + \mathbf{T}''\mathbf{x}'')^\top \mathbf{T}'' \quad (3.14)$$

ehk

$$\forall j \in \{1, 2, \dots, L\} :$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^L (T'_{ik}x'_k + T''_{ik}x''_k) T'_{ij} \quad (3.15)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^L (T'_{ik}x'_k + T''_{ik}x''_k) T''_{ij}.$$

Näiteks võib vaadata süsteemi joonisel 3.1; ühenduste maatriksid on

$$\mathbf{T}' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}'' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

ja esialgne faasimõõturite paigutus on

$$\mathbf{x}' = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^\top, \quad \mathbf{x}'' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^\top. \quad (3.17)$$

Sisestades need võrrandisse (3.12), on tulemuseks $[2 \ 2 \ 0]^\top$, nagu võib oodata, sest mõlemad PMUd mõõdava pinget harude L1 ja L2 ühises sõlmes.

Kui muuta vektorid \mathbf{x}' ja \mathbf{x}'' PMU-de alternatiivset paigutust kirjeldama, on korrutise tulemuks $[1 \ 1 \ 2]^\top$, kus liini L3 kohta on otsesed mõõtmised harudega L1 ja L2 jagatud sõlmedest. Kuna faasimõõturitega liinidelt on olemas ka volufaasorite mõõtmised, on iga liini kohta olemas võrdne arv otseselt mõõdetavaid suursi.

Optimeerimise lisatingimuse, mis tagab igale harule vähemalt ühe otsese mõõtmise, saab püs-

titada järgmiselt

$$\begin{aligned} \forall j \in \{1, 2, \dots, L\} : \\ \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^L (T'_{ik}x'_k + T''_{ik}x''_k) T_{ij} \geq 1. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Samas on võimalik tagada eelmises alapeatükis vaadeldud harude jälgitavus ainult pingemõõtmiste abil, kui haru mõlemad otsad on mõne faasimõõturi poolt mõõdetud. Seda saab määrata järgmise lisatingimusega

$$\begin{aligned} \forall j \in \{1, 2, \dots, L\} : \\ \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^L (T'_{ik}x'_k + T''_{ik}x''_k) T'_{ij} \geq 1 \\ \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^L (T'_{ik}x'_k + T''_{ik}x''_k) T''_{ij} \geq 1. \end{aligned} \quad (3.19)$$

Eelnevat arvestades saab optimeerimisülesande kokku võtta sihifunktsiooniga

$$\min \sum_{j=1}^L c'_j x'_j + c''_j x''_j \quad (3.20)$$

ja lisatingimustega

$$\begin{aligned} \forall i \in \{1, 2, \dots, N\} : \\ \sum_{j=1}^L T_{ij}(x'_j + x''_j + p'_j + p''_j) \geq r_i + 1, \end{aligned} \quad (3.21)$$

$$\begin{aligned} \forall j \in \{1, 2, \dots, L\} : \\ \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^L [T'_{ik}(x'_k + p'_k) + T''_{ik}(x''_k + p''_k)] T'_{ij} + x'_j + x''_j + p'_j + p''_j \geq 1 \\ \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^L [T'_{ik}(x'_k + p'_k) + T''_{ik}(x''_k + p''_k)] T''_{ij} + x'_j + x''_j + p'_j + p''_j \geq 1, \end{aligned} \quad (3.22)$$

millest viimane teeb kindlaks, et iga haru on jälgitav kas vähemalt ühe faasimõõturiga liinil või pingemõõtmistega kummastki haru otsast.

Lisaks võib püstitada tingimuse

$$\begin{aligned} \forall j \in \{1, 2, \dots, L\} : \\ x'_j + x''_j + p'_j + p''_j \leq 1, \end{aligned} \quad (3.23)$$

mis määrab ära, et arvestatakse liinide, mitte PMU-de, rikkeid. (Antud tingimust tuleb kohandada, kui mõnel liinil on juba kaks faasimõõturit.) Samas, kui tahetakse arvestada PMU-de riketega, kuid ei soovita haru ühte otsa paigutada rohkem kui ühte seadet, võib tingimuse kirjutada järgmiselt

$$\begin{aligned} \forall j \in \{1, 2, \dots, L\} : \\ x'_j + p'_j \leq 1 \quad \text{ja} \quad x''_j + p''_j \leq 1. \end{aligned} \quad (3.24)$$

3.2.3. Optimaalsed lahendused

Väljatöötatud lahendusmeetodit on rakendatud, et leida Eesti 330 kV võrgu jaoks optimaalne paigutus täiendavatele faasimõõturitele, mis muudaks süsteemi jälgitavaks teatud töökindluskriteeriume järgides. Arvestades juba paigaldatud ja praeguseks planeeritud faasimõõturitega, on leitud liinide otsad, kuhu võiks paigaldada veel puuduva jälgitavuse saavutamiseks faasimõõturid.

Vaadeldud on nelja näidisülesannet, mis lisavad lahendusele erinevaid tingimusi. Kõik ülesanded on püstitatud eelnevalt kirjeldatud võrranditega. Antud ülesannetes on kõigi faasimõõturite paigaldamine eeldatud sama kulukaks. Optimeerimisprobleemid on püstitatud binaarsete lineaarprogrammeerimise ülesannetena ning lahendatud GAMS tarkvara CPLEX mooduliga [6].

Esimese variandina leitakse optimaalne lahend, mis tagab süsteemi kõigi sõlmede jälgitavuse. See tähendab, et iga sõlme pingefaasorid on kas otseselt mõõdetavad või arvutatavad mõne liini teises otsas oleva faasimõõtuuri mõõteandmetest. Ülesande lahenduse saab leida võrranditest (3.1) ja (3.5), võttes $r_i = 0$.

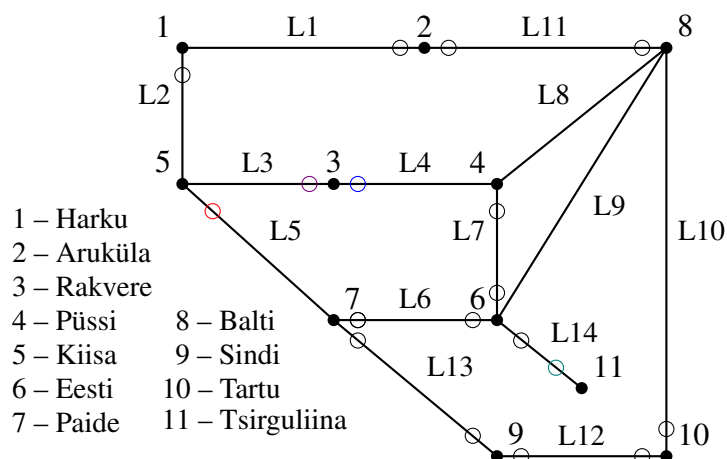
Teise variandina leitakse faasimõõturite paigutus, mis tagab kõigi sõlmede jälgitavuse mistahes liini rikke korral (N–1 kriteerium). Siinkohal peab aga arvestama, et sellist nõudmist ei saa täita Tsirguliina alajaama suhtes, mis on ülejäänud 330 kV võrguga ühendatud ühe liiniga. Ülesande saab lahendada võrranditega (3.20), (3.21) ja (3.23), võttes $\forall i \in \{1, 2, \dots, 10\} : r_i = 1$ ja $r_{11} = 0$.

Kolmas lahendus tagab süsteemi sõlmede jälgitavuse arvestades N–1 ja N–2 kriteeriume faasimõõturi rikete suhtes. Sealjuures peavad N–2 arvestades jälgitavad olema sõlmed, mida ühendab ülejäänud süsteemiga rohkem kui kaks liini ning ülejäänud sõlmede jälgitavus peab vastama N–1 kriteeriumile. Lahendus põhineb võrranditel (3.20), (3.21) ning (3.24), millest viimane määrab ära, et liinide otstesse ei paigaldata pralleelseid faasimõõtureid. Töökindluse kriteeriumid määratakse järgmiselt

$$\mathbf{r}^T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 1 & 2 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.25)$$

Viimasena leitakse faasimõõturi optimaalne paigutus, mis tagab kõigi sõlmede jälgitavuse ja lisaks sellele ka iga liini kohta vähemalt kaks otsest mõõtmist. Antud lahenduse korral on lisaks kõigi sõlmede pingefaasoritele jälgitavad ka kõigi liinide koormused ja kaod. Ülesande saab lahendada võrrandite (3.20), (3.22) ja (3.24) alusel.

Kuna faasimõõturi paigaldamise kulukuses ei tehtud antud näidete puhul vahet, võib esimese kolme ülesande lahenduseks anda harud, millele faasimõõturid paigaldama peaks. Esimese näite puhul oleks sobivateks lahenditeks haru 3 või 4 ehk liin 506 või 360. Teise ülesande lahenduseks on harud 3 ja 4 ehk liinid 506 ja 360. Kolmandaks lahenduseks on harud 3, 4, 5 ja 14 ehk liinid 506, 360, 357 ja 353. Neljanda probleemi puhul on oluline, millisesse haru otsa faasimõõtur on paigaldatud. Üheks võimalikuks lahendiks on $x'_3 = 1$ ja $x'_5 = 1$ ehk liini 506 Rakvere AJ poolne ots ja liini 357 Kiisa AJ poolne ots. Lahendused on koos toodud joonisel 3.2.



Joonis 3.2 Olemasolevad, praeguseks planeeritud (mõlemad tähistatud mustade ringidega) ning nelja optimeerimisülesande lahendusena paigutatud faasimõõturid (tähistatud värviliste ringidega).

3.3. Kokkuvõte

Käesolevas peatükis vaadeldi elektrisüsteemi oleku jälgitavust faasimõõtmiste abil. Olemasolevate faasimõõturite mõõtmistest eraldati võimalikult palju andmeid ja võrreldi neid estimaatori tulemustega. Lisaks sellele uuriti, kuidas oleks võimalik vähima arvu täiendavate seadmetega terve 330 kV võrk jälgitavaks teha ja sealjuures tagada erinevaid jälgitavuse ja töökindluse kriteeriume.

Faasimõõtmiste juures vaadeldi otseselt mõõdetavaid ja liini ühest otsast teise otsa jaoks arvutatud pingefaasoreid ja võimsusvooge. Lisaks sellele vaadeldi ilma faasimõõturita liinide võimsusvoogude estimateerimist ainult liini kahe otsa sõlmedes mõõdetud pingetest. Otsesed ja liini teise otsa jaoks arvutatud väärtused erinesid estimaatori tulemustest küllaltki vähe, mis näitab, et faasimõõtmised on oleku jälgimises rakendatavad. Ainult pingefaasoritest estimateeritud võimsusvood andsid erinevate liinide puhul erineva kvaliteediga tulemusi, mis oli tõenäoliselt põhjustatud liiniparameetrite erinevast täpsusastmest.

Seejärel täiendati faasimõõturite optimaalse paigutuse teooriat, et see sobiks reaalses oludes kasutatavate PMU-de paigutuse leidmiseks ja vajalike kriteeriumide täitmiseks. Antud teooriat rakendades vaadeldi nelja erinevat optimeerimisülesannet, millega süsteemi jälgitavus erinevaid kriteeriume arvestades tagada. Antud probleemide lahendused on aruandes toodud ning nende põhjal oleks võimalik kogu 330 kV võrk jälgitavaks teha teatud jälgitavuse ja töökindluse tingimusi arvestades.

3.4. Kirjandus

- [1] R. Emami and A. Abur, "Robust measurement design by placing synchronized phasor measurements on network branches," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 25, no. 1, pp. 38–43, Feb 2010.
- [2] Z. Miljanić, I. Djurović, and I. Vujošević, "Optimal placement of PMUs with limited number of channels," *Electric Power Systems Research*, vol. 90, no. 0, pp. 93–98, 2012.
- [3] M. Korkali and A. Abur, "Placement of PMUs with channel limits," in *Power Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE*, July 2009, pp. 1–4.
- [4] J. E. Anderson and A. Chakraborty, "A minimum cover algorithm for PMU placement in power system networks under line observability constraints," in *Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE*, July 2012, pp. 1–7.

- [5] B. Gou, “Generalized integer linear programming formulation for optimal pmu placement,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 23, no. 3, pp. 1099–1104, Aug 2008.
- [6] *GAMS — A User’s Guide*, GAMS Development Corporation, Washington, DC, USA, Sept. 2014. [Online]. Available: www.gams.com

4 Ülekandevõrgu seire ja arengusuunad

Elektrisüsteemi talitluse jälgimine ja juhtimine on tänapäeva elektrisüsteemides toimunud muutuste mõjul muutunud järjest enam komplitseeritumaks ning tarvilik on teada võimalike protsesside teoreetilist tausta ning omada moodsaid juhtimisvahendeid. Arvestades enamike elektrisüsteemide talitlemist järjest lähemal stabiilsuse piiridele on oluline adekvaatselt määrata stabiilsuse varu ning hinnata elektrisüsteemi talitluse hetkeolukorda ja võimalikke tendentse reaalselt. Olulisel kohal on võimalike avariitõrjeautomaatika lahenduste kasutamine ning nende töökindlus.

Käesolevas peatükis käsitletakse ülekandevõrgu seire ja juhtimisega seotud küsimusi. Eesmärk on anda ülevaade elektrisüsteemi juhtimise taustast ning erinevate rakenduste mõjust elektrisüsteemi talitlusele. Vaadeldakse ülekandevõrgu operatiivjuhtimise, talitluse arvutamise ja talitluskindluse küsimusi. Tähtsal kohal on elektrisüsteemi stabiilsuse ning sageduse ja pinge reguleerimisega seotud küsimused. Peatüki teine pool hõlmab laimõõtesüsteemi olemust ja kasutamist elektrisüsteemi juhtimisel ning selle võimalikke arengusuundasid Eesti elektrisüsteemi kontekstis.

4.1 Ülekandevõrgu operatiivjuhtimine

Elektrisüsteem on elektri tootmise, edastamise ja jaotamise tehniline süsteem, mille moodustavad enamasti ühe riigi territooriumil asuvad elektrijaamad, mida üksteisega, tarbijatega ja teiste riikide elektrisüsteemidega ühendab elektrivõrk koos juhtimis-, kaitse- ja sidesüsteemidega. Viimastel aastakümnetel on maailmas kujunenud trend, mis allutab traditsioonilised monopoolsed majandusharud (side-, gaasi-, elektri-, sooja-, veemajandus jm) vabaturu konkurentsile, jagab elektrisüsteemi konkurentsile alluvaks energiatootmiseks, vaba juurdepääsu kaudu konkurentsi toetavaks põhivõrguks ja loomuliku monopolina toimivateks jaotusvõrkudeks. Elektrisüsteemis energia akumulierimise (elektrilao) puudumine sunnib elektrituru osapooli toimima ühtse süsteemina, mis peab vastama töökindluse ja optimaalsuse nõuetele ning tagama tarbijate katkematu varustamise kvaliteetse elektrienergiaga. Elektrisüsteemi talitlust juhib põhivõrgu juhtimiskeskus, mis

- jälgib riigi elektrisüsteemi ühendatud elektrijaamade, põhivõrgu ja jaotusvõrgu koostööd, korraldab ja jälgib lülitamisi ning elektrisüsteemis tekkinud häirete ja rikete kõrvaldamist põhivõrgus
- koordineerib tehnilist koostööd riigi elektrisüsteemiga erinevatel tingimustel liitunud tarbijatega ja teiste riikide elektrisüsteemidega

- koordineerib elektrisüsteemi kaitse- ja automaatikasüsteemide tööd elektrijaamades ja -võrkudes ning põhivõrgust toidetavate tarbijate juures ja kooskõlastab kaitse- ning automaatikafunktsioone teiste elektrisüsteemidega
- tagab vaba elektrituru toimimise, kindlustades elektrienergia ülekande, tootmise ja tarbimise bilansi ning töökindluse (reservid).

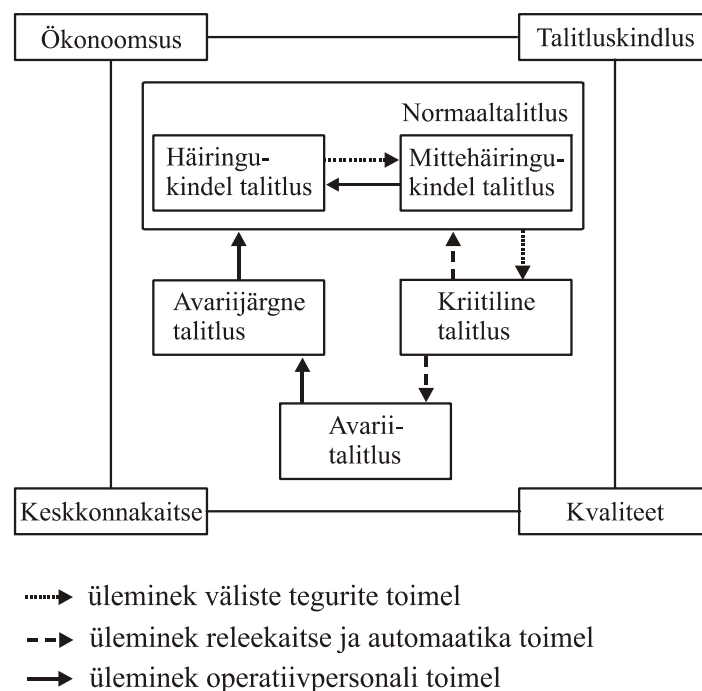
Elektrivõrgu operatiivjuhtimine on eraldatud administratiivjuhtimisest ja moodustab iseseisva käsuliini, mis tegutseb ööpäev läbi kõikidel nädalapäevadel. Süsteemi juhtimisega tegelev operatiivpersonal jaguneb juhtivaks ja alluvaks valvepersonaliks. Juhtiva valvepersonaliga hulka kuuluvad näiteks ühendsüsteemi, põhivõrgu ja võrguettevõtete valvedispetšerid ning elektrijaamade vahetusülemad (valveinsenerid). Alluva valvepersonaliga moodustavad elektrijaama elektritsehhi vahetusülem, energiabloki vahetusülem, elektrijaama valveelektrikud, operatiivbrigaadide liikmed, operatiivremondipersonal (remondipersonal, kellel on elektriseadmete teenindamise ja lülitamise õigus). Operatiivpersonaliga ametijuhendid ja juhtiva valvepersonaliga vastastikuste suhete lepingud määravad vahetuse juhtide tegevuspiirkonna, nende õigused, kohustused, käsuliini detailid ja kvalifikatsiooni. Vabaturul, kus näiteks remonditeenus võib ka osta, tuleb teeninduslepingu sõlmimisel arvestada operatiivkäidu nõudeid ja, vastupidi, pakutav remonditeenus võib mõjutada operatiivkäidu traditsioone.

Tabel 4.1. Elektrisüsteemi talitluse liigid

Talitluse liik	Lühike iseloomustus	Juhtimise eesmärk
Normaaltalitus:	Kõik seisundiparameetrid muutuvad suhteliselt aeglaselt ja lubatud piires	Talitluse seire, optimeerimine, toite pidevuse tagamine
häiringukindel talitus mittehäiringukindel talitus	Häiringute puhul säilib normaaltalitus Häiringute puhul ei säili normaaltalitus	Häiringukindluse säilitamine Häiringukindluse taastamine
Kriitiline (raskendatud) talitus	Seisundiparameetrid muutuvad suhteliselt aeglaselt, kuid üks või mitu neist on väljunud lubatud piiridest	Normaaltalitluse taastamine
Avariitalitus	Seisundiparameetrid muutuvad kiiresti suurtes piirides	Rikke lokaliseerimine, avariilaienemise vältimine, töötalitluse taastamine (automaatne)
Avariijärgne talitus	Osa tarbijaid võivad olla välja lülitatud, süsteemi töösse jäänud osa talitus on normaalne	Normaalse häiringukindla talitluse taastamine kogu süsteemi ulatuses

Operatiivjuhtimise objektiks on elektrisüsteemi talitus. Talitluse all mõistetakse ajas kulgevat protsessi – süsteemi seisundite ajalist järgnevust. Talitlust iseloomustavad seisundiparameetrid (pinged, pingektorite nurgad, võimsusvood, voolud, koormused, genereerivad võimsused jm), mis muutuvad üleminekul ühest seisundist teise, s.t talitluse käigus. Püsitalitluses

muutuvad seisundiparameetrid suhteliselt väikestes piirides ja küllaltki aeglaselt. Püsitalitlusesse kuuluvad normaal-, kriitilised ja avariijärgsed talitlused. Kuna püsitalitluses võib seisundiparameetrid suhteliselt pika aja jooksul lugeda küllaldase täpsusega konstantseks, siis räägitakse püsitalitluse analüüsi asemel sageli püsiseisundi analüüsist. Siirdetalitlusi iseloomustab parameetrite kiire muutumine suurtes piirides. Siirdetalitlustest pakuvad praktilist huvi avariitalitlused kui raskeimad. Avariitalitluste kestus on suhteliselt lühike. Elektrisüsteemi talitluse liike on kokkuvõtlikult kirjeldatud tabelis 4.1 ning illustreeritud joonisel 4.1, kus on ära näidatud ka talitluse juhtimise eesmärgid.



Joonis 4.1. Elektrisüsteemi talitluse liigitus ja juhtimise eesmärgid

Põhilise aja töötab elektrisüsteem häiringukindlas normaaltalitluses, kusjuures täidetud on ka talitluse ökonoomsuse, elektrienergia kvaliteedi ja keskkonnakaitse nõuded. Normaaltalitus on elektrisüsteemi normaalskeemile ja käidueskirjadele vastav staatiliselt ja dünaamiliselt stabiilne talitus. Normaaltalitluses võib esineda ka tehnoloogilisi piiranguid ja energia kvaliteedinõuete rahuldavaid või mitterahuldavaid seisundeid. Tavaliselt määrab normaaltalitluse operatiivkäidu abiteenistus mingi ajavahemiku jaoks ja dispetšerile antakse juhised selle hoidmiseks. Oluline on tagada elektrisüsteemi talituskindlus (stabiilsus) eriti suurtes piirides muutuvate transiidivoogudega süsteemides. Optimaalsuse kriteeriumiks on enamasti kadude, harvem ka käidukulude miinimum. Tänapäeval on elektri tootmisega ja tarbimisega seotud optimeerimistoimingud asendunud elektriturul osalejate tegevusega. Põhivõrgu pädevusse on jäänud elektri ülekande optimeerimine. Normaaltalitluses tuleb tagada plaanitud vahetus-

võimsused teiste elektrisüsteemidega ning tagada vajalik aktiiv- ja reaktiivvõimsuse reserv. Järgitakse põhivõrgu kontrollsõlmede pingegraafikuid, mis on koostatud talitluse töökindlust ja optimaalsust silmas pidades.

Dispetšeri käsutuses olevad normaaltalitluse juhtimise vahendid:

- trafoastmete muutmine (pinge piki- ja põikreguleerimine)
- pingeregulaatorite ja kompenseerimisseadmete sätete muutmine
- kondensaatorpatareide ja šuntreaktorite sisse- ja väljalülitamine
- trafode paralleeltöösse lülitamine või reservi viimine
- alalisvooluliinide talitluse juhtimine
- aktiivvõimsuse juhtimine pikikondensaatoritega ja faasinihutitega
- koormuste juhtimine
- reservgeneraatorite lülitused.

Põhivõrgus on pinget võimalik reguleerida trafoastmete ümberlülitamise ning kompenseerimisseadmete ja generaatorite reaktiivvõimsuse muutmise teel. Trafoastmete lülitustega reguleeritakse ennekõike jaotusvõrkude toitepingeid. Ülekandevõrkude pingeniivo reguleerimiseks kasutatakse šuntreaktoreid (pingeniivo alandamiseks) ja kondensaatorpatareisid (pingeniivo tõstmiseks). Järjest enam võetakse kasutusele jõuelektroonikal põhinevaid *FACTS*-seadmeid (*SVC*, *STATCOM*), mis võrreldes tavapäraste šuntreaktorite ja kondensaatorpatareidega võimaldavad tunduvalt kiiremat ja sujuvamat reaktiivvõimsuse ja sellest tulenevalt ka pingeniivo juhtimist. Kompenseerimisseadmete toimekiirus on eriti vajalik elektrisüsteemi stabiilsuse kindlustamiseks.

Trafode paralleeltööle lülitamine aitab tõsta piirkonna talitluskindlust. Samas tuleb arvestada trafo tühijooksukadude suurenemisega. Seetõttu tuleb talitluse pikaajalisel plaanimisel arvesse võtta nii majanduslikke kui ka tehnilisi tingimusi.

Aktiivvõimsusvoogude juhtimiseks ülekandevõrkudes on mitmeid võimalusi. Põhimõtteliselt on kõige lihtsam muuta generaatorite väljundvõimsust. Muuta võib ka alalisvooluliinide võimsust nii süsteemidevaheliste kui süsteemisiseste võimsusvoogude juhtimiseks. Süsteemisisene võimsusvoogude jagunemine, mis toimub elektrotehniliste seaduste alusel, võib siiski põhjustada mõne liini või trafo ülekoormuse. Ka võib elektriyaamade ja süsteemidevaheliste võimsuste muutmine olla vastuolus elektrituru toimimistingimustega. Aktiivvõimsuse jagunemist on võimalik muuta ka ülekandeliinile ühendatud pikikondensaatorite sisse- või väljalülitamisega, mis muudab liini reaktiivtakistust ja seeläbi ka võimsusvoogude jagunemist

elektrivõrgus. Kasutusel on veel lisapingetrafod ja faasinihutid, mille abil saab muuta pingevекtori nurka ja ühtlasi võimsusvoogude jagunemist. Faasinihutid põhinevad nüüdisajal samuti jõuelektroonikal (nt võimsusvoogude kontrolleri *DFC*).

Elektrisüsteemi mittestabiilsuse ennetamiseks või liinide ja trafode pikaajaliste ülekoormuse vältimiseks on dispetšeritel võimalik koormusi mõneks ajaks välja lülitada. Seda võimalust kasutatakse siiski vaid äärmise abinõuna.

Elektrisüsteemi dispetšeri käsutuses on tavaliselt reservgeneraatoreid, mida kasutatakse kas genereeriva võimsuse avariilisel vähenemisel või koormustippude katmiseks, kui tekivad kõrvalekalded süsteemi plaanitud bilansist. Bilansi taastamiseks kasutatakse reguleerreservi. Elektrisüsteemi dispetšer informeerib kõrvalekaldest võimsusebilanssi mittetäitvat bilansihaldurit, kes peab teatama, kuidas ta kavatses oma eabilansi kõrvaldada ja kui palju selleks kulub aega. Vahetusvõimsuste saldo muutmiseks saab lepingute olemasolul kasutada ka naaberelektrisüsteemide reguleerimisvõimsusi. Reaktiivvõimsuse eabilansi korral kasutab elektrisüsteemi dispetšer tema käsutuses olevaid reaktiivvõimsuse juhtimise vahendeid (kondensaatorpatareid, šuntreaktorid jm).

Kui talitus on väliste tegurite mõjul muutunud mitteoptimaalseks või väljunud lubatud piiridest, on dispetšeri ülesanne kõrvalekalded likvideerida, kindlustada tarbijad kvaliteedinõuetele vastava energiaga ja taastada talitluse optimaalsus. Dispetšer toimib suhteliselt aeglaste ja väikeste häirete korral, mis ei põhjusta releekaitse või süsteemiautomaatika rakendumist. Suurte ja kiirete muutuste mõju, näiteks reaktiivvõimsuse genereerimine ja kompenseerimine alalisvooluliini otstes või tõukelisest koormusest tekkivad pingekaod, kompenseeritakse türistorseadmetel põhineva automaatika abil.

Talitus pole häiringukindel, kui mõni talitluse muutuja on väljaspool ettenähtud piire ning avarii tekkimise tõenäosus on suurenenud. Kuigi mittehäiringukindlas talitluses on tarbijate toide säilinud, esineb mõni järgnevatest olukordadest:

- ei ole täidetud $n-1$ tingimus
- puudub vajalik avariireserv
- ei ole tagatud plaanitud aktiiv- või reaktiivvõimsuse bilanss
- elektrisüsteemi sagedus- või pingehälbed on suuremad lubatavatest
- trafode või liinide koormused on suuremad kui normaalolukorras lubatud
- ei ole tagatud elektrisüsteemi andmehõive.

N-1 tingimus ei ole täidetud, kui elektrisüsteemi ühe põhielemendi väljalülitumine põhjustab elektrivarustuse katkestusi ja avariaautomaatika toimimist. Sellised talitlused, mis tekivad, kui mõni oluline element (elektriliin, trafo jm) on eelnevalt välja langenud, on lubatud ainult lühikest aega.

Vajaliku avariireservi puudumine elektrisüsteemis võib olla tingitud sellest, et olemasolev reserv on juba käigus või reservi hoidev generaator on tööst välja langenud. Sel juhul tuleb dispetšeril tellida reserv mujalt.

Elektrisüsteemi plaanitud aktiivvõimsuse bilansist kõrvalekaldumine võib olla tingitud mõne seadme avariilisest väljalülitumisest. Bilansi taastamiseks kasutatakse reguleerireservi ja vajaduse korral aktiveeritakse avariireserv. Vahetusvõimsuste saldo muutmiseks saab lepingute olemasolul kasutada ka naaberelektrisüsteemide reguleerimisvõimsusi. Elektrisüsteemi dispetšer informeerib võimsusbilanssi mittetäitvat bilansihaldurit kõrvalekaldest, kes peab teatama, kuidas ta kavatses oma eabilansi kõrvaldada ja kui palju selleks aega kulub. Reaktiivvõimsuse eabilansi korral kasutab elektrisüsteemi dispetšer tema käsutuses olevaid reaktiivvõimsuse juhtimise vahendeid (kondensaatorpatareid, šuntreaktorid jm).

Juhul kui elektrisüsteemi sageduse- või pingehälbed on suuremad lubatavatest, tuleb elektrisüsteemi dispetšeril võtta kasutusele vajalikud meetmed. Sagedust reguleeritakse ühendüsteemides kooskõlastatult. Sageduse sekundaarreguleerimine süsteemis IPS/UPS, kuhu ka Eesti kuulub, toimub Moskvas asuva tsentraalse regulaatoriga, mis juhib Volga kaskaadi hüdrojaamu. Selle tõttu ei ole Eestis vaja ka vastavat suhteliselt kiirelt toimivat reguleerireservi. Lääne-Euroopa sünkroonpiirkonna normatiivide kohaselt tuleb sagedus taastada 15 minuti jooksul võimaliku jääkhälbe ± 20 mHz piiridesse. Pinge lubatud hälbed põhivõrgu kontrollsõlmedes määratakse talitluse plaanisel süsteemi talitluskindlust ja talitluse optimaalsust silmas pidades. Lubatust suuremate pingehälvete korral peab elektrisüsteemi dispetšer kasutama reaktiivvõimsuse kompenseerimise vahendeid või muutma trafode ülekandesuhteid. Pinge reguleerimiseks võib kasutada alalisvoolulinke, generaatoreid või teha koostööd naabersüsteemidega. Juhul kui kõik mainitud võimalused on kasutatud, võib pingel alandamiseks lülitada välja alakoormatud 330 kV ülekandeliine või tekitada trafoastmete erinevustega reaktiivvõimsuse parasiitvooge, mis põhjustavad reaktiivenergia kadude suurenemist ja pingel alandamist.

Trafode ülekoormuse korral püütakse vähendada trafo koormust, lülitades välja kompenseerimiseseadmeid trafo alampinge poolelt, muutes ülekandesuhet või viies osa koormust mõne

teise trafo toitele. Kui ülekoormust ei ole võimalik sel teel vähendada, siis tuleb trafo rikke vältimiseks lülitada välja tarbimist. Dispetšer jälgib tugevasti koormatud liinide voole. Kui mis tahes liini koormusvool ületab tema kestvalt lubatavat voolu, peab dispetšer tarvitusele võtma abinõud voolu vähendamiseks. Kasutada võib koormuse sundjagunemist ja tarbimise piiramist või genereerimise muutmist.

Mittehäiringukindla talitluse üheks juhtumiks on häired andmehõivesüsteemi töös, mis takistavad elektrisüsteemi talitluse seiret ja juhtimist. Võimalikud on SCADA-süsteemi rikked või sidehäiringuid. Dispetšerite ülesandeks on andmehõivesüsteemi jälgimine ja võimalikest rike- ketest teavitamine.

Välised tegurid (äike, liinidesse tuule või lumega paindunud oksad, linnud, loomad, seadmete tõrked, inimtegevus jm) põhjustavad elektrivõrkudes avariitalitlusi, mida iseloomustab protsesside kiire kulg, seadmete ja inimeste võimalikud vigastused, elektrivarustuse häired ja oht talitluse stabiilsusele. Protsesside kiirus välistab enamasti inimese sekkumise võimaluse, mistõttu vajalikud lülitused teeb releekaitse ja süsteemiautomaatika. Elektrisüsteemi elementide suur hulk ja mitmekesisus tekitab erinevaid avariilukordi. Töökindluse tagamise meetmete tõttu esineb suuri süsteemseid avariisid harva, enamiku avariidest moodustavad kohaliku tähtsusega rikked. Statistika näitab, et umbes pooled releekaitse ja automaatika poolt elektrivõrkudes tehtud väljalülitamised on põhjustatud mööduvatest lühistest. Seetõttu on tarbijate toite kiire taastamise huvides otstarbekas kasutada automaatset taaslülitamist. Eduka taaslülituse korral sarnaneb dispetšeri tegevus normaaltalitluse juhtimisega, lisandub vaid rikke registreerimine, selle asukoha määramine ja releekaitse töö registreerimine. Kui rike on püsiva iseloomuga, pole normaaltalitluse taastamine võimalik ja süsteem läheb avariitalitlusse.

Avariitalitluse likvideerimise põhieesmärk on vähendada avariist tingitud kahjusid nii võrgu- ettevõttele kui ka tarbijatele. Dispetšer peab lähtuma järgmistest põhimõtetest:

- kättesaadava info põhjal (telemõõtmised, mõõteriistade näidud, telesignaalid, välised tunnused jm) tuleb luua üldine ettekujutus juhtunust
- võimaluse piires selgitada välja rikke koht, iseloom ja ulatus
- mitte vahele segada automaatikaseadmete töösse, kui seda pole ette nähtud juhendis
- eraldada vigastatud seade (võrgu osa)
- hoida ära avarii laienemine
- nii kiirelt kui võimalik likvideerida rike, kõrvaldada oht inimestele, loomadele ja avariist puutumata seadmetele

- moodustada avariijärgne töökindel skeem ja tagada pingegraafikuga ette antud pinge kontrollsõlmedes
- pärast rikkes võrguelemendi remonti taastada tarbijatele elektrivarustuse normaalskeem.

Avariitalitluse tekkides on oluline välja selgitada võimsuslülitite sisse- ja väljalülitumised, pinge olemasolu, ebanormaalse talitluse tekkimine ja lubatust suuremad hälbed (võnkumine, sageduse ja pinge muutumine, generaatorite, liinide ja trafode ülekoormus või asümmeetria), ilmsed lühise tundemärgid väljalülitunud seadmetel või nende läheduses, releekaitse-, avariitõrje automaatikaseadmete rakendumine, avarii koht, sündmuste järjekord (millises järjekorras lülitusid võimsuslülitid, rakendusid releekaitseid, avariitõrjeautomaadid ning tehnoloogilised kaitsed), milline on avariijärgne talitus. Avariitalitluse likvideerimisel on dispetšeril õigus muuta ka nende seadmete seisundeid, mis normaaltalitluse korral ei ole tema juhtida, anda korraldusi hoolduses olevatel seadmetel töö viivitamatult lõpetada ning need seadmed töösse rakendada ja välja või sisse lülitada (ülekanделиinid, trafod jm).

Ülekandevõrkude avariisid võib liigitada järgmiselt:

- õhu- ja kaabelliinide väljalülitumine
- alajaamade lattide avariitalitused
- trafode rikked
- generaatorite avariitalitlused
- tulekahjud
- süsteemiavariid

Ülekandeliinide väljalülitumisel tuleb esimesel võimalusel määrata kindlaks lühise asukoht, kasutades selleks lühisekohamäärajaid. Õhuliini väljalülitumisel on dispetšeril lubatud pärast ebaedukat taaslülitust, kui tarbijad on toiteta või on vaja piirata tarbimisvõimsust või kui tekib häiritud talitus, liini proovipingestada. Kaabelliinide väljalülitumisel on proovipingestamine keelatud. Rikkekoha otsimine ja liini pingestamine toimub koostöös käidukorraldajaga.

Alajaamade lattide avariitalitluse mõju on tunduvalt suurem kui mõne üksikelemendi väljalülitumine. Pingetuks võib jääda kogu süsteemi osa või vähemalt konkreetne alajaam. Avarii põhjuseks võib olla lattide või mõne ühenduse võimsuslülitite tõrge. Latid võivad pingetuks jääda ka kõikide toitvate ühenduste väljalülitumisel. Latte võib proovipingestada pärast ülevaatus ja vigastatud osa eraldamist. Võimsuslülitite tõrkekaitse rakendumisel tuleb tõrkunud võimsuslülitite skeemist lahklülititega lahutada ning pingestada latid.

Trafode rikked mõjutavad üldjuhul süsteemi talitluskindlust. Erinevalt jaotusvõrkudest, kus trafo väljalülitumine võib põhjustada tarbijate pikaajalist pingeta jäämist, on põhivõrgu alajaamades enamasti kaks trafot, mistõttu saab tarbijad üle viia teisele trafole. Trafo väljalülitumisel peab dispetšer selgitama, millise releekaitse rakendumise tõttu väljalülitumine toimus. Trafo astmelülititega seotud rikete (blokeeringud, tõrked, faaside lahkujooksud jms) korral peab dispetšer informeerima käidukorraldajat, kes seejärel otsustab, mis edasi teha. Trafo gaasikaitse signaalrelee rakendumise korral peab dispetšer kasutama tarbijate toitmiseks alternatiivseid võimalusi ja lülitama trafo kohe välja. Käidukorraldaja loal võib väljalülitunud trafo viia töösse tagasi, kui see on tehniliselt lubatav.

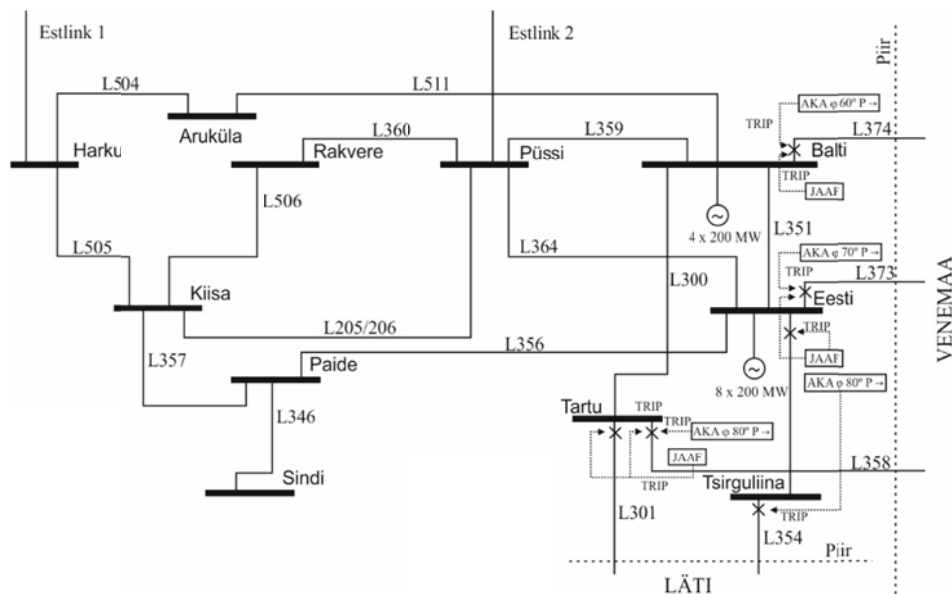
Generaatorite avariid mõjutavad otseselt elektrisüsteemi talitlust, kuid üldjuhul tegeletakse generaatori probleemidega elektrijaamades. Elektrisüsteemi dispetšeril tuleb generaatorite avariide korral leida sobiv reserv. Generaatorite taaslülitamine võrku toimub elektrisüsteemi dispetšeri nõusolekul.

Tulekahjude korral on dispetšeri ülesandeks teha pingetuks tulekahjuga seotud elektriseadmed, lahutada skeem ning maandada seadmed. Välja lülitada tuleb ka seadmed, mis võivad takistada kustutustöid või rikneda. Esimesel võimalusel tuleb taastada väljalülitatud tarbijate toide.

Süsteemivariid saavad alguse mõne generaatori, elektrijaama, süsteemidevahelise ülekandeliini vm väljalülitumisest. Järgneb sündmuste jada, mille tulemuseks on elektrisüsteemi täielik või osaline kustumine. Süsteemivariiga kaasneb sageduse suur kõikumine ning saartalitluse teke. Süsteemivariide vältimiseks on kasutusel avariitõrjeautomaatika. Efektiivne on koormuste väljalülitamine pinge või sageduse järgi. Eesti elektrisüsteemis on automaatsed koormuse väljalülitid alapinge järgi paigaldatud kõikidesse 110 kV ja kõrgema pingega alajaamadesse. Kasutusel on pingesätted 90...102 kV 2,5...10-sekundilise toimeajaga. Koormuse väljalülitamine alasageduse tõttu toimub kaheastmeliselt. Esimesel astmel on sätteväärtused 48,7...49,1 Hz ja 10...60 sekundit, teisel 47,1...48,8 Hz ja 0,15...0,3 sekundit. Nimetatud kaitsed haaravad ligemale 60% kogu Eesti koormusest. Generaatorid lülitatakse välja, kui sagedus on tõusnud üle 50,4...56,0 Hz. Ajalised sätteväärtused on 0,1 sekundist kuni 30 minutini. Sagedusel 56,0 Hz lülitatakse Eesti ja Balti Elektrijaamas välja kõik turbogeneraatorid.

Süsteemidevahelise asünkroontalitluse takistamiseks on kasutusel asünkroontalitluse kaitsed, mis lülitavad vastava liini välja, kui liini otstevaheliste pingete nurkade erinevus on suurem sätteväärtusest (nt 60...80°). Tulemuseks võib olla Eesti eraldumine ühendsüsteemist, kusjuu-

res kasutusel on veel eraldusautomaatika sageduse järgi, mis toimib, kui sagedus langeb alla 47,6 Hz. Eesti elektrisüsteemi eraldusautomaatikat on illustreeritud joonisel 2.2, kus AKA tähistab asünkroontalitluse kaitset ja JAAF sagedusejärgset jaotusautomaati. Tegelikkuses ei ole Eesti elektrisüsteemi eraldusautomaatika seni kordagi rakendunud. Küll on aga Eesti elektrisüsteemi talitlemist iseseisva süsteemina katsetatud. Kuna katsetused on olnud edukad, siis võib järeldada, et suurte häiringute korral on Eesti elektrisüsteem võimeline iseseisvalt talitlema.



Joonis 4.2. Eesti elektrisüsteemi eraldusautomaatika põhimõtteskeem

Lisaks normaaltalitluse juhtimisele ja avariide likvideerimisele tuleb dispetseritel ette valmistada alajaamade ja liinide hooldusi. Plaaniliste remontide kava koostatakse käidukorraldajate nõudeavalduste alusel igaks kuuks ja kooskõlastatakse vajadusel nii teiste võrkude kui ka tehnoloogilise käidu osakonnaga. Plaaniväliseid remonte tehakse avariiliste nõudeavalduste alusel. Dispetšeri ülesanne on teha avalduses märgitud seadme remondiks vajalikud ümberlülitamised, rakendada remondi ajaks tööohutuse abinõud ning välja anda teade töökohtade ettevalmistamise kohta elektrisüsteemi juhtimiskeskuse poolt. Tööde lõppedes taastab dispetser elektrivarustuse normaalskeemi.

Hoolduste plaanimisel tuleb analüüsida hooldatava elemendi väljalülitamise mõju süsteemi talitlusele. Vaadeldakse $n-1$ tingimuse täitmist või selle puudumisest tingitud halvimaid olukordi, pingeniivoosid võrgus, plaanitakse reservid, jälgitakse võimsusvoogusid elektrisüsteemi sees ja vahetusvõimsuste muutusi teiste elektrisüsteemidega jm. Keerulisemate ja probleem-

semate talitluste korral koostatakse dispetšeritele sellekohased juhendid, mille alusel tuleb häiringu tekkimisel taastada elektrisüsteemi häiringukindel talitus.

Järjest enam kerkivad päevakorda tuuleelektrijaamad ja nende mõju elektrisüsteemi talitlusele. Tuuleelektrijaamade summaarne genereerimine ei tohi seada ohtu süsteemi talitluskindlust. Süsteemihaldur peab kontrollima tuuleelektrijaamade toodangu prognoosi ja selle mõju plaanitavale talitlusele ning määrama vajadusel preventiivsed piirangud. Süsteemihaldur piirab tuuleparkide toodangut sellises mahus, et oleks tagatud süsteemi tasakaal ning plaanitud vahetusvõimsus naabersüsteemidega.

4.2 Ülekandevõrgu juhtimise tugi

Elektrivõrgu operatiivjuhtimisel lahendatavad ülesanded on matemaatiliselt küllaltki elementaarsed ega nõua keerukaid arvutusi. Elektrivõrgu talitluse analüüsimiseks ning selle töökindluse, ökonoomsuse ja elektrienergia kvaliteedi tagamiseks vajalikud põhjalikumad arvutused tehakse talitluse plaanimisel vallastöötlusena. Plaanitud talitlust püütakse operatiivjuhtimise käigus realiseerida. Kuna aga tegelikkus kaldub alati kõrvale prognoosidest (elektritur, koormuse hälbed, avariid, ilmastikuolud jm), tuleb arvutusi operatiivjuhtimise ajal korrata ning plaanitud talitlust korrigeerida. Programmikompleksi, mis toetab põhivõrgu juhtimist, nimetatakse talitluse tugisüsteemiks (*Energy Management System, EMS*).

Talitluse tugisüsteemi funktsioonidena saab vaadelda:

- püsitalitluse analüüs
- talitluse estimateerimine
- talitluskindluse analüüs
- energiatootmise ohjamine
- koormuse seire.

Olenevalt vaatenurgast võib dispetšisüsteemi (*SCADA*) lugeda üheks talitluse tugisüsteemi komponendiks või iseseisvaks kompleksiks. Igal juhul on nendevaheline tihe side elektrivõrgu operatiivjuhtimisel vältimatu.

4.2.1 Püsitalitluse analüüs ja estimateerimine

Talitluse all mõistetakse protsessi – süsteemi seisundite ajalist järgnevust. Talitlust iseloomustavad seisundiparameetrid (pinge, pingektorite nurk, võimsusvoog, vool, koormus, genereeriv võimsus jm), mis talitluse ajal muutuvad. Püsitalitluse analüüsil rakendatakse ühe kindla ajahetke, s.t seisundi, arvutusmeetodeid. Talitluste liigitus sõltuvalt seisundiparameetrite muutumise kiirusest ja ulatusest on järgmine:

- *Püsitalitus*. Seisundiparameetrid muutuvad väikestes piirides ja suhteliselt aeglaselt. Siia kuuluvad normaal-, kriitilised ja avariijärgsed talitlused. Elektrisüsteem viibib põhilise osa ajast püsitalitluses. Kuna püsitalitluses võib seisundiparameetreid lugeda pikema aja jooksul konstantseks, siis räägitakse püsitalitluse analüüsi asemel sageli püsiseisundi analüüsist.
- *Siirdetalitlust* iseloomustab parameetrite kiire muutumine suurtes piirides. Siirdetalitlustest pakuvad praktilist huvi avariitalitlused kui raskeimad. Avariitalitluste kestus on suhteliselt lühike.

Püsiseisundite arvutus on üks sagedamini sooritatavoid arvutusi energiasüsteemi talitluse juhtimisel ja analüüsil, hõlmates 50...60% operatiivarvutuste kogumahust. Püsiseisundeid arvutatakse nii iseseisvalt kui teiste ülesannete (talitluse optimeerimise, talitluskindluse ja stabiilsuse analüüsi) koostisosana. Tal on oluline koht plaanimis- ja projekteerimisarvutustes. Püsiseisundite arvutuste rakendusi on tabelis 4.2.

Tabel 4.2. Püsiseisundite arvutamise eesmärgid.

Rakendus	Kirjeldus
Talitluse plaanimine	Seisundi lubatavuse kontroll ja viimine lubatud piirkonda
Talitluskindluse (häiringute) analüüs	Liinide, trafode ja generaatorite väljalülitamise mõju uurimine häiringute analüüsi käigus
Pinge ja reaktiivvõimsuse analüüs	Pinge reguleerimis- ja kompenseerimisseadmete efektiivsuse analüüs
Edastusvõime analüüs	Süsteemidevaheliste sidemete edastusvõime ja vahetusvõimsuse analüüs
Talitluse optimeerimine	Seisundi lubatavuse kontroll ja viimine lubatud piirkonda optimeerimisülesande koostisosana
Staatilise stabiilsuse analüüs	Raskendatud seisundi arvutus stabiilsuse analüüsi koostisosana
Sidusjuhtimine, talitluskindluse tõstmine	Korrigeerivate meetmete analüüs häiringute mõju leevendamiseks
Kadude analüüs	Seisundiparameetrite arvutamine võimsus- ja energiakadude hindamiseks
Projekteerimine ja arengu plaanimine	Võimsuse jagunemise, pingeniivoode ja pingelangude arvutus

Seisundiparameetrid võib sõltuvalt konkreetsest ülesandest jagada i) sõltumatuteks ehk antud parameetriteks (juhitavad parameetrid (nt genereerivad võimsused, pinged), mittejuhitavad parameetrid (nt koormused)) ja ii) sõltuvateks ehk otsitavateks parameetriteks.

Sõltuvate parameetrite koosseis oleneb ülesandest ja võib olla üsna suur (pingemoodulid ja -nurgad, aktiiv- ja reaktiivvõimsusvood elementide alguses ja lõpus, vool elementides, aktiiv- ja reaktiivvõimsuskao elementides, pingelangud elementides jm).

Erilisel kohal on suurused, mis on arvutatavad ainult elektrivõrgu võrrandisüsteemi lahendamise teel ja mille alusel leitakse ülejäänud sõltuvad parameetrid. Neid nimetatakse seisundi põhiparameetriteks. Olles arvanud põhiparameetrid, on muud sõltuvad parameetrid leitavad lihtsate elektrotehnikas tuntud seoste (Ohmi seaduse, Kirchhoffi seaduste jm) abil. Seega on enamiku võrguülesannete lahendamisel põhiprobleem, kuidas arvutada seisundi põhiparameetrid, mille koosseis sõltub lahendamiseks valitud võrguvõrranditest (ka vastupidi – põhiparameetrite valik määrab võrguvõrrandid). Tänapäeval on üldlevinud võrguvõrranditeks sõlme pingevõrrandid, kus seisundi põhiparameetriteks on pingemoodulid ja -nurgad sõlmedes.

Matemaatiliselt taandub talitluse arvutamine kõrget järku mittelineaarse algebralise võrrandisüsteemi lahendamisele. Lisaks võrrandisüsteemi lahendusmeetodi valikule kerkib esile rida probleeme, nagu lahendi olemasolu, lahendite kvaliteet (missugusel mitmest võimalikust lahendist on füüsikaline mõte), võrrandite struktuuri kvaliteet (võrrandisüsteemi tingitus), võrrandite hõredus jm.

Talitluse arvutused nõuavad süsteemi esitust matemaatilise mudelina, milleks on võrgu ekvivalentse aseskeemi kohta koostatud elektrivõrgu võrrandid. Elektrivõrgu aseskeem koostatakse tema elementide aseskeemidest. Elektrivõrgu elemendid võib jaotada passiivseteks ja aktiivseteks.

Passiivseteks elementideks on elektriliinid, trafod, põikreaktorid ja -kondensaatorid. Vahel võib võrk sisaldada ka selliseid elemente nagu pikireaktorid ja -kondensaatorid, alalisvoolu ülekandeid muundusjaamadega jm.

Aktiivseteks elementideks on genereerivad allikad (generaatorid ja sünkroonkompensaatorid) ning koormused.

Ühendades passiivsete elementide aseskeemid võrguskeemi kohaselt ning tehes vajalikud lihtsustused (rööpjuhtivuste kokkuliitmine, sõlmevõimsuste leidmine jm), saadakse elektrivõrgu aseskeem, mis koosneb sõlmedest ja neid ühendavatest harudest ning sõlmevõimsustest. Harusid sõlme ja maa vahel nimetatakse põikharudeks, harusid sõlmede vahel aga pikiharudeks.

Sõlmepinge võrrandid (edaspidi **sõlmvõrrandid**) esitatakse võimsuste balansi kujul sõlmedes. Põhiparameetriteks on pingemoodulid ja -nurgad, mis esitatakse kompleksuuruste \underline{U}_i ($i = 1, \dots, n$) kujul, kus n on sõltumatute sõlmede arv. Arvutuskiiruse huvides on eelistatav kompleksvõrranditelt üle minna reaalsele. Siis on otsitavateks $2n$ reaalsel muutujat, mille leidmiseks tuleb lahendada $2n$ võrrandist koosnev süsteem.

Sõlmvõrrandite üldkuju on järgmine:

$$P_i = U_i^2 G_{ii} + U_i \sum_{j \in \bar{i}(i)} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij})$$

$$Q_i = -U_i^2 B_{ii} + U_i \sum_{j \in \bar{i}(i)} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad i = 1 \dots n$$

kus P_i ja Q_i – sõlme summaarne aktiiv- ja reaktiivvõimsus

U_i ja δ_{ij} – sõlmepinge moodul ja pingetevaheline nurk ($\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$)

G_{ij} ja B_{ij} – üldistatud sõlmejuhitavused.

Võrguvõrrandid võib esitada üldistatult kujul

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \mathbf{f} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\delta} \\ \mathbf{U} \end{bmatrix}$$

kus

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\delta} = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_n \end{bmatrix} \quad \mathbf{U} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix}$$

Asjaolu, et seisundi põhiparameetrite alusel saab leida ülejäänud seisundiparameetrid, võib kirja panna järgmiselt:

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x})$$

kus \mathbf{z} – seisundiparameetrite vektor

\mathbf{x} – seisundi põhiparameetrite (sõlmepingete) vektor

$\mathbf{h}(\mathbf{x})$ – Kirchhoffi seadustest tulenevate võrguvõrrandite vektorfunktsioon.

Kui aseskeemi harusid iseloomustavad enamasti vaid juhtivused (trafodel ka ülekandetegurid), siis sõltuvad sõlmedes etteantud ja otsitavad suurused sõlme tüübist (tabel 4.3). Võrran-

disüsteemi määratlemiseks on vajalik üks sõltuv ehk tugisõlm, mille jaoks on teada pingemoodul ja -nurk, genereeritav aktiiv- ja reaktiivvõimsus on aga määratud võimsuse balansiga.

Kuna võrguvõrrandid on mittelineaarsed, lahendatakse nad iteratiivsetel meetoditel, lineariseerides võrrandid igal iteratsioonil. Üks lihtsamaid on Gaussi-Seideli meetod. Tänapäeval on siiski kõige efektiivsemaks tunnustatud Newtoni-Raphsoni meetod ja selle modifikatsioonid ning seetõttu on need ka kõige enam levinud.

Tabel 4.3. Elektrivõrgu aseseemi sõlmede tüübid.

Sõlme tüüp	Sõlme iseloomustus	Antud	Otsitavad
Generaator-sõlm ehk PU-sõlm	Elektrijaamad, reaktiivvõimsuse allikad	P_i, U_i Q_i^-, Q_i^+	δ_i, Q_i
Tugisõlm	Sagedust või vahetusvõimsust reguleeriv jaam, jaotusvõrgu toitealajaam	$\delta_b = 0, U_b$ Q_b^-, Q_b^+	P_b, Q_b
Koormussõlm ehk PQ-sõlm	Koormused, väikesed elektrijaamad	P_i, Q_i või $P_i(U_i), Q_i(U_i)$	δ_i, U_i
Passiivsõlm	Puudub nii koormus kui genereerimine (sisuliselt koormussõlme erijuhtum)	$P_i = 0, Q_i = 0$	δ_i, U_i
Jäiksõlm	Sageduse või vahetusvõimsuse reguleerimises osalev jaam, jaotusvõrgu toitealajaam	$\delta_i, U_i, Q_i^-, Q_i^+$	P_i, Q_i

Newtoni-Raphsoni meetodi kohaselt saadakse lahend järjekordsel iteratsioonil seosest

$$\begin{bmatrix} \delta^{(k+1)} \\ \mathbf{U}^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(k)} \\ \mathbf{U}^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\delta^{(k)} \\ \Delta\mathbf{U}^{(k)} \end{bmatrix}$$

kus parandused $\begin{bmatrix} \Delta\delta^{(k)} \\ \Delta\mathbf{U}^{(k)} \end{bmatrix}$ leitakse lineaarvõrrandisüsteemi

$$\mathbf{A}(\delta^{(k)}, \mathbf{U}^{(k)}) \begin{bmatrix} \Delta\delta^{(k)} \\ \Delta\mathbf{U}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} - f \begin{bmatrix} \delta^{(k)} \\ \mathbf{U}^{(k)} \end{bmatrix}$$

lahendamisel

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta^{(k)} \\ \Delta\mathbf{U}^{(k)} \end{bmatrix} = (\mathbf{A}(\delta^{(k)}, \mathbf{U}^{(k)}))^{-1} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} - f \begin{bmatrix} \delta^{(k)} \\ \mathbf{U}^{(k)} \end{bmatrix} \right)$$

Siin

$$\mathbf{A}(\boldsymbol{\delta}^{(k)}, \mathbf{U}^{(k)}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \boldsymbol{\delta}} \\ \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{U}} \end{bmatrix} \begin{matrix} \boldsymbol{\delta} = \boldsymbol{\delta}^{(k)} \\ \mathbf{U} = \mathbf{U}^{(k)} \end{matrix}$$

on võrrandisüsteemi osatuletiste maatriks ehk jakobiaan

$$\mathbf{A}(\boldsymbol{\delta}, \mathbf{U}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \boldsymbol{\delta}} & \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \mathbf{U}} \\ \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \boldsymbol{\delta}} & \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \mathbf{U}} \end{bmatrix}$$

Tänapäeval kasutatakse Newtoni-Raphsoni meetodi modifikatsioone, eriti nn kiiret lõhestatud meetodit, mis lihtsustuste tõttu kindlustab arvutuse kiire koonduvuse tunduvalt väiksema arvutuste mahu juures.

Radiaalvõrkude püsitalitluse arvutus konventsionaalse Newtoni-Raphsoni või kiirel lõhestatud meetodil ei ole efektiivne. Otstarbekam on rakendada lihtsat kahekäigulist iteratsiooniprotsessi, mille vastukäigul arvutatakse võimsuskaod ja võimsusvood liinides, alustades fiidri lõpust, pärikäigul aga arvutatakse pinge sõlmedes, alustades toitealajaama lattidest, kus pinge on teada. Kuna jaotusvõrkudes on liini otsasõlmede pingevektorite vaheline nurk väike, siis nurki tavaliselt ignoreeritakse ja pinge sõlmedes arvutatakse pingekao alusel.

Kuigi jaotusvõrkude käit toimub radiaalvõrkudena, tekib mõnikord vajadus suletud võrgu arvutuseks (nt optimaalsete lahutuskohtade leidmisel). Siis on kasutatavad konventsionaalsed suletud võrkude arvutusmeetodid – Gaussi-Seideli või Newtoni-Raphsoni meetod. Kiire lõhestatud meetod jaotusvõrkudele ei sobi, sest nendes pole täidetud üks meetodi põhieeldusi, et võrgu elementidele $X/R \gg 1$. Siiski on ka jaotusvõrkudele välja töötatud rida lõhestatud algoritme.

Püsitalitluse arvutustes eeldatakse enamasti, et kolmefaasilise süsteemi talitus on sümmeetriline ning pinge ja vool muutuvad siinuseliselt. See võimaldab kolmefaasilise süsteemi analüüsil piirduda ühe faasi suurustega ning esitada süsteem ühejoonelise aseskeemina. Tulemused on laiendatavad kõigile kolmele faasile. Siiski võib vahel esineda ka mittesümmeetriline talitus ning tekkida vajadus selle arvutamiseks. Mittesümmeetria põhjusteks võivad olla mittetäisfaasiline talitus (kõrgepingeliinide rikete või remontide korral), mittesümmeetriline koormus (võimsad ühefaasilised tarbijad, nt kaarahjud), võrgu mittesümmeetrilised elemendid (nt transponeerimata või puuduliku transpositsioonitsükliga elektriliinid). Mittesümmeetrilise seisundi arvutuse võib teha faasisuurustes, kuid laiemalt on kasutusel sümmeetriliste kompo-

nentide meetod, mille puhul kolmefaasiline mittesümmeetriliste suuruste süsteem esitatakse kolme sümmeetrilise komponendi, päri-, vastu- ja nulljärgnevuskomponendi summana. Üldjuhul ei ole sümmeetriliste komponentide meetod vähem töömahukas kui arvutus faasikoordinaatides, kuid tal on suuri eeliseid praktiliselt olulisel juhul, kus elektrivõrk ja selle elemendid on sümmeetrilised, s.t kui mittesümmeetria on tingitud ainult koormusest.

Kui võrku lülitatud tarbijate hulgas on palju türistoralaldeid või muid mittelineaarse voltamperkarakteristikuga tarviteid, muutub voolu ja pinge kuju märgatavalt erinevaks siinuselisest, s.t voolu ja pinge kõverad sisaldavad kõrgemaid harmoonikuid. Mittesiinuselist talitlust arvutatakse superpositsiooni printsiibil – seisund saadakse erinevatele harmoonikutele vastavate seisundite summeerimisel. Mingile antud harmoonikule vastavad võrguvõrrandid on siinuse- lise talitluse võrrandid.

Talitluse estimateerimine

Elektrivõrgu operatiivjuhtimiseks vajalikud andmed saadakse enamasti andmehõive- ja andmeedastussüsteemide vahendusel. Sel teel hangitud (mõõte)andmed võivad sisaldada küllaltki suuri vigu või on andurite, sidekanalite jm häirete ning rikete tõttu ebapiisavad. Jämedatest vigadest võimaldab andmeid osaliselt puhastada mõõtetulemuste eeltöötlus: etteantud piirides oleku kontroll, haru otstes mõõdetud võimsusvoogude võrdlemine, Kirchhoffi esimese seaduse täidetuse kontroll üksikutes sõlmedes, haru võimsusvoo ja võimsuslülitite asendisignaalide võrdlemine jm. Eeltöötlus aitab selgitada ka võrgu konfiguratsiooni ning esile tuua muid talitlusega seotud seiku.

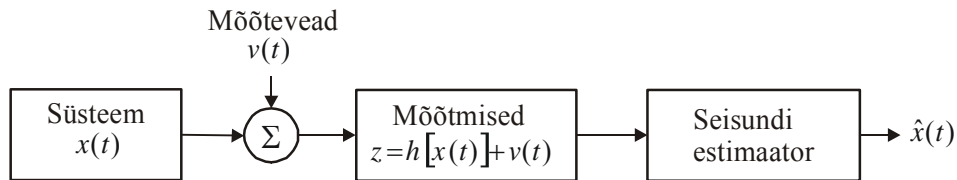
Suurema usaldusväärsusega andmete saamiseks on mõõtetulemusi vaja estimateerida. Estimateerimine tähendab elektrivõrgu matemaatilisel mudelil baseeruvat andmete käsitlemist, mille eesmärk on puhastada mõõtetulemused vigadest ja suurtest häiretest ning arvutada (hinnata) mõõtmata jäänud suurusi. Olenevalt elektrisüsteemi talitluse dünaamika arvestamise tasemest eristatakse staatilist estimateerimist, mis toimub ühe ajahetke andmete alusel, ja dünaamilist estimateerimist, mis kasutab ära ka varem saadud tulemused, ning nende vahevormi – jälgivestimateerimist.

Staatilise estimateerimise eesmärk matemaatilises mõttes on leida oleku põhiparameetrite vektori \mathbf{x} hinnang (estimaat) $\hat{\mathbf{x}}$, minimeerides jääkide vektorit

$$\mathbf{r} = \mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})$$

kus \mathbf{z} – mõõdetavate suuruste vektor, mille komponentideks on tavaliselt aktiiv- ja reaktiivvõimsusvoogude ning sõlmevõimsuste (injektsioonide) ning pingete mõõtmised,

\mathbf{x} – seisundi põhiparameetrite vektor, mille komponentideks on pingete nurgad ja moodulid,
 $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ – Kirchhoffi seadustest tulenevate võrguvõrrandite vektorfunktsioon, mis seob vektoreid \mathbf{z} ja \mathbf{x} . Olgu märgitud, et funktsioon $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ sõltub nii võrgu struktuurist kui mõõtmiste koosseisust. Estimateerimist illustreerib joonis 4.3.



Joonis 4.3. Seisundi estimateerimise protseduur.

Jääkide \mathbf{r} minimeerimiseks kasutatakse enamasti kaalutud vähimruutude meetodit, mille kohaselt minimeeritakse sihifunktsiooni

$$\mathbf{J}(\hat{\mathbf{x}}) = [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})]^T \mathbf{Q}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})] = \min$$

Siin tähistab \mathbf{Q} mõõtevigade kovariatsioonimaatriksit, millest arvestatakse ainult diagonaal-elemente, s.o mõõtevigade dispersioone. Nendele vastavad standardhälbed on leitavad kujul $b \cdot TS$, kus TS on mõõteriista skaala ulatus ja b konstant.

Esitatud tingimusele vastab mittelineaarne vektorvõrrand

$$\nabla \mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial \mathbf{x}} = 2 \mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}) \mathbf{Q}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})] = 0$$

kus

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}) = \left. \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}}$$

on vektorfunktsiooni $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ jakobiaan.

Saadud võrrandisüsteem lahendatakse iteratiivse protseduuriga

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} + \Delta \mathbf{x}^{(k)}$$

$$\mathbf{G}^{(k)} \Delta \mathbf{x}^{(k)} = \mathbf{b}^{(k)}$$

kus \mathbf{G} on nn kasvumaatriks ja \mathbf{b} vabaliikmete vektor. Lineariseerides funktsiooni $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ punktis $\mathbf{x}^{(k)}$ Tayloriga ritta arenduse teel, mille juures säilitatakse kaks esimest liiget, ning asendades tulemuse vaadeldavas võrrandis, saame Newtoni tüüpi protseduuri, nn baasalgoritmi, mille puhul

$$\mathbf{G}^{(k)} = \mathbf{H}^T(\mathbf{x}^{(k)})\mathbf{Q}^{-1}\mathbf{H}(\mathbf{x}^{(k)})$$

$$\mathbf{b}^{(k)} = \mathbf{H}^T(\mathbf{x}^{(k)})\mathbf{Q}^{-1}[\mathbf{P} - \mathbf{H}(\mathbf{x}^{(k)})]$$

Estimeerimise põhimõtet ja probleeme võib illustreerida lihtsa näite varal. Olgu tehtud mingi sõltuvuse $y = f(x)$ $m = 6$ mõõtmist ja saadud tulemuseks andmed x_i, \tilde{y}_i ($i = 1, \dots, 6$). Samuti olgu teada, et seda sõltuvust kirjeldab ruutfunktsioon

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2$$

Leiame $n = 3$ tundmatut parameetrit a_0, a_1 ja a_2 vähimruutude meetodil

$$S = \sum_{i=1}^m [\tilde{y}_i - (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2)]^2 = \min$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_j} = 2 \sum_{i=1}^m [\tilde{y}_i - (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2)] x_i^j = 0, \quad (j = 0, \dots, 2)$$

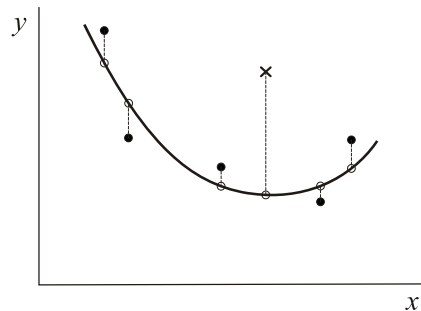
mis annab otsitavate parameetrite a_0, a_1 ja a_2 leidmiseks lineaarse võrrandisüsteemi

$$a_0 \sum_{i=1}^m x_i^j + a_1 \sum_{i=1}^m x_i x_i^j + a_2 \sum_{i=1}^m x_i^2 x_i^j = \sum_{i=1}^m \tilde{y}_i x_i^j, \quad (j = 0, \dots, 2)$$

Näidet illustreerib joonis 4.4. Siin on üks mõõtetulemustest (joonisel tähistatud \times -ga) osutunud mittesobivaks. (Mittesobivate andmete leidmise võtteid siinkohal ei vaadelda.) Andmeliiasus, mis esialgu oli $6/3 = 2$, kahanes selle tulemusena $5/3 = 1,7$ -ni. On selge, et andmeliiasus, mis iseenesest on estimeerimisel hädavajalik, ei taga veel usaldatavaid tulemusi. Kui kõik m mõõtmist oleksid tehtud kitsas x -telje vahemikus (vastab elektrivõrgu talitluse halvale vaadeldavusele), võinuks estimeerimise tulemused olla hoopis teised. Estimeerimise tulemusena saadud parameetrite a_0, a_1 ja a_2 alusel võib leida mõõdetud suuruste täpsustatud väärtused, estimaadid (joonisel tähistatud \circ -ga). Praktiliselt on ennekõike oluline mittesobivate andmete avastamine, sest nende kasutamine edaspidistes arvutustes võib viia suurte eksimusteni.

Staatilisel estimeerimisel lähtutakse antud ajahetke andmetest. Kasutamata jäävad nii varasemad andmed kui estimeerimise tulemused. Varasemate andmete ära kasutamine tähendaks dünaamilist estimeerimist, mis eeldab süsteemi talitluse dünaamikamudeli olemasolu. Staatilise ja dünaamilise estimeerimise vahevormiks on jälgivestimeerimine, mis põhineb eeldusel, et olekvektor \mathbf{x} muutub kahe järjestikku ajaintervalli vahel vähe. Kuigi jälgiv- ja dünaami-

line estimeerimine on põhimõtteliselt täiuslikumad kui staatiline estimeerimine, näitavad kogemused, et jälgiv- ja dünaamiline estimaator teevad suuremaid vigu kui staatiline estimaator, seda eriti süsteemi seisundi järsul muutumisel, aga ka süstemaatiliste mõõtevigade korral. Seetõttu kasutatakse praktikas enamasti staatilisi estimaatoreid.



Joonis 4.4. Ruutfunktsiooni estimeerimine.

Lisaks põhimõttelistele raskustele tuleb estimeerimise käigus lahendada selliseid probleeme nagu

- võrguvõrrandite koostamine
- vaadeldavuse analüüs
- halbade andmete kindlakstegemine
- mudeli vigade avastamine
- halbade ja puuduvate andmete asendamine.

Võrguvõrrandid $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ peavad vastama võrgu konfiguratsioonile ja mõõtmiste koosseisule. Praktiliselt koostatakse võrrandid esmalt suuremale võrgule ja mõõtmiste koosseisule ning korrigeeritakse seejärel olukorra kohaselt. Elektrivõrgu jooksva skeemi koostamine on konfiguraatori ülesanne. Konfiguraator on algoritm, mis telesignaali ja käsitsi sisestatud info alusel koostab võrgu jooksva skeemi, kontrollides seda telemõõtmiste järgi. Efektiivne konfiguraator põhineb võrgutopoloogia loogilisel käsitlemisel. Võrguvõrrandite lahendamise põhiliseks arvutuslikuks probleemiks on kasvumaatriksi \mathbf{G} suured mõõtmed ja selle ümberarvutamise vajadus igal iteratsioonil.

Vaadeldavuse analüüsi ülesanne on selgitada, kas mõõtmiste hulk on küllaldane elektrivõrgu oleku hindamiseks ja kui mitte, siis milliste võrguosade olekut on võimalik hinnata (tuleb leida nn vaadeldavad piirkonnad). Matemaatiliselt seostub vaadeldavuse analüüs jakobiaani astaku määramisega.

Halvad andmed töödeldavate mõõteandmete hulgas võivad muuta estimaadi ebakvaliteetseks ja isegi kõlbmatuks. Mõõtmistulemuste vigade kõrval võivad väärad olla ka telesignaalid, mis põhjustavad normaalvõrrandite struktuurivigu. Suured ja ilmsed vead avastatakse eeltöötle-

mise käigus. Halbade andmete, s.o mõõtevigade ja valede telesignaali avastamiseks tuleb neid esmalt detekteerida, s.t kindlaks teha, kas neid üldse esineb. Jaatava vastuse korral tuleb vead identifitseerida – üles leida kõik vigased andmed. Olgu märgitud, et kõik halvad andmed pole detekteeritavad. Nii ei ole detekteeritavad nn kriitilised mõõtmised, s.o mõõtmised, mille eemaldamine mõõtesüsteemist muudab süsteemi mittevaadeldavaks.

Estimeerimisvigade üks põhjus võib olla võrgu tegelike parameetrite ja võrrandite koostamisel kasutatud erinevad parameetrid, aga ka võrguskeemi ehk struktuuri vead. Suuri vigu põhjustavad trafode valed ülekanalitegurid (trafoastmed). Pika liini korral võib määravaks saada põikjuhtivuse sõltuvus ilmastikust.

Peale halbade andmete detekteerimist ja identifitseerimist tuleb need eemaldada ja korrata estimeerimist või asendada enne estimeerimise jätkamist arvatavalt sobiva väärtusega. Esimesel juhul koostatakse uuesti kasvumaatriks, kusjuures halveneda võib selle tingitus või süsteem osutada mittevaadeldavaks. Halvad andmed saab asendada pseudomõõtmistega, mille all mõistetakse seisundiparameetrite prognoositud väärtusi. Pseudomõõtmiste kasutamine väldib mõõtmiste eemaldamisest põhjustatud raskusi.

4.2.2 Koormuse seire

Elektrivõrgu koormus (aktiivvõimsus, reaktiivvõimsus või vool) on aluseks elektrivõrgu käidu- ja plaanimisülesannete lahendamisel. Koormus muutub regulaarselt ajas, sõltub ilmastikust ja on stohhastilise iseloomuga. Koormust võib mõningal määral juhtida ära kasutades muutuvaid tariife või koormuse sõltuvust talitusparameetritest (pinge, sagedus). Need võimalused on siiski sekundaarsed, talitluse iseloomu täpsustavad. Primaarseks jääb koormuse käitumine, selle muutumise seaduspärasused.

Koormust käsitletakse nii elektrisüsteemi kohta summaarselt kui ka elektrivõrgu üksikute sõlmede kaupa. Koormusi on vaja prognoosida lühema või pikema ennetusajaga (mõnest tunnist aastani ja enam), aga ka analüüsida ja imiteerida. Vajalike koormusandmete laad sõltub rakendusest. Peaaegu alati on tegemist matemaatilise ootusega koormuse pikaajalise prognoosi või mõne muu nimetuse all. Olenevalt ülesandest vastab matemaatiline ootus võimsuse või voolu keskvaertusele ajahetkel või energiale mingis ajavahemikus (tund, ööpäev, nädal, aasta). Sageli vajatakse ka koormuse tinglikku matemaatilist ootust ehk lühiajalist prognoosi. Lühiajalisse prognoosi (ennetusajaga mõni ööpäev) kuulub enamasti koormuse sõltuvus temperatuurist. Pikaajalise prognoosi ja koormuse analüüsi korral võib temperatuurisõltuvust imiteerida. Koormuse juhuslikkust kirjeldab tema ruuthälve. Rakendusest sõltuvalt võib vaja

minna veel muidki suurusi ehk koormusnäitajaid, mis kirjeldavad koormuste erinevaid omadusi.

Levinud on lähenemisviis, kus vajalik koormusnäitaja (enamasti lühiajaline prognoos) leitakse formaalsete meetoditega otseselt koormusandmete alusel, mis on antud aegridade kujul. Kasutusel on suur hulk meetodeid, mis põhinevad regressioonanalüüsil, aegridade mudelitel, neurovõrkudel jm. Meetodi valik sõltub nii lähteandmete iseloomust (andmete hulk) kui vajalikust tulemusest (prognoosi ennetusaeg). Iseloomulik on, et põhitähelepanu pööratakse mingi formaalmatemaatilise meetodi rakendamisele olemasolevate lähteandmete ja vajaliku tulemuse kohaselt. Koormuse füüsikalisi omadusi võetakse arvesse vaid pinnapealselt.

Kuigi traditsiooniline lähenemine koormuse käsitlemisele võib anda kasutuskõlblikke tulemusi, saab koormusnäitajaid leida tunduvalt täpsemalt ja mitmekülgsemalt, kui koostada koormuse matemaatiline mudel. Mudeli koostamisel selgitatakse välja koormuse füüsikalised omadused ja esitatakse need kvantitatiivselt. Niisiis kirjeldatakse mudelis otseselt koormust, mitte olemasolevaid koormusandmeid (aegridu) nagu traditsioonilise lähenemisviisi korral. Mudeli koostamisel seatakse eesmärgiks kirjeldada koormusele omaseid seaduspärasusi. Modelleerimisel ei pöörata tähelepanu koormusandmete omadustele (nt diskreetimissagedusele) ja mahtudele. Tõepoolest ei sõltu ju koormuse omadused sellest, mil viisil seda mõõdetakse. Ka koormuse vajalikud näitajad (lühi- või pikaajaline prognoos jms) jäävad esialgu tagaplaanile. Silmas peetakse vaid koormusmudelite rakendusvaldkonda ja sellest tulenevaid üldisi nõudeid.

Mudelis arvestatakse koormuse muutuste seaduspärasusi.

- *Regulaarsed muutused*, milleks on ööpäeva-, nädala- ja aastasisesed perioodilisused, trend ning koormuse iseloom erandpäevadel.
- *Temperatuurisõltuvus*, mille osakaal on näiteks elekterkütte korral küllaltki suur. Mudelis arvestatakse temperatuurisõltuvuse inertsi, mittelineaarsust ja ajalisi muutusi.
- *Sõltuvus talitusparameetritest*, mis avaldub koormuse pinge- ja sagedustundlikkusena.
- *Juhuslikkus* on eriti märgatav väikestel jaotusvõrgu koormustel. Selliste koormuste ruutvälbe suhe matemaatilisse ootusesse on suhteliselt suur. Ka võib väikestes koormustes esineda suuremaid kõrvalekaldeid, mis ei sobi kokku normaaljaotusega.
- *Juhitavus*. Koormust juhitakse enamasti kaudselt elektritariifide abil. Esineb ka otsest juhtimist elektrivõrgu operatiivpersonali poolt. Juhitavuseks võib lugeda põhivõrgu sõlme koormuste muutusi, mis on tingitud ümberlülitustest jaotusvõrgus.

Mudeli struktuur on kõigile koormustele sama. Selleks et mudelit oleks võimalik rakendada, tuleb selle parameetrid estimeerida. Estimeerimisel kasutatakse ära nii regulaarsed koormusandmed (aegread) kui ka muu kvantitatiivne ja kvalitatiivne teave. Kui olemasolevatest andmetest ei piisa mudeli kõigi parameetrite hindamiseks, võib kasutada tüüpmodelle, s.o mudeli parameetrite tüüpilisi komplekte. Sel juhul leitakse vaadeldava koormuse andmetel statistilistel või muudel kaalutlustel sobiv arv parameetreid ning ülejäänud kantakse üle tüüpmodelist. Tulemuseks on samalaadne mudel kõigile koormustele sõltumata estimeerimisviisist ja kasutatud andmete hulgast. Kui estimeerimisel oli andmeid rohkem, on tulemus vaid täpsem – mudel kirjeldab paremini vaadeldava koormuse omadusi ja võimaldab leida täpsemad koormusnäitajad. Kuna koormuse omadused muutuvad, tuleb mudeli parameetreid aegajalt (nt kord aastas) täpsustada. Mudeli parameetreid tuleb täiendavalt estimeerida ka koormuse järskude muutuste korral, nagu suuremate tarbijate lisandumine või kadumine, põhi võrgu sõlmekoormuste muutused jaotusvõrgu ümberkujundamise tõttu jms.

4.2.3 Talitluse arvutusprogrammid

Nüüdisaegsed püsiseisundite arvutusprogrammid püüavad automaatselt tagada ka seisundi lubatavuse, s.t koondumise lahendiks, mille puhul on täidetud kõik kitsendused või vähemalt enamik neist.

- Sõlmedes, milles reguleeritakse pinget (tugisõlm või koormussõlm), antakse ette pinge lubatud hälbed. Kui võrrandisüsteemi lahendamise mingil iteratsioonil on pinge piiridest väljas, muudetakse lähima reguleeritava trafo astet seni, kuni pinge on taas lubatud piirides.
- Generaatorsõlmedes antakse ette aktiiv- ja reaktiivvõimsuste piirid. Kui mõne generaatori reaktiivvõimsus ületab etteantud piiri, siis fikseeritakse reaktiivvõimsus sellel piirväärtusel ja seda sõlme käsitletakse edaspidi kui koormussõlme, mille pinge on muutuv.
- Kui etteantud piiri ületab aktiivvõimsus, jagatakse liigne võimsus ülejäänud generaatorite vahel.
- Kui pinge või reaktiivvõimsus ei ole ettenähtud piirides, vaatamata eespool mainitud abinõudele, muudetakse kondensaatorpatareide ja reaktiivvõimsuse kompensatorite lülitusi saavutamaks vastuvõetav tulemus.
- Ühendsüsteemis püüab iga alamsüsteem hoida vahetusvõimsust etteantud tasemel. Kui vahetusvõimsus on kaldunud ettenähtust kõrvale, tuleb seda hiljem muuta tagamaks energiavahetuse ettenähtud tase.

Operatiivpersonali (dispetšerite) tarvis koostatakse sageli talitluse arvutamise eriprogramm,

mille võimalused on küll piiratumad kui talituse plaanimisel kasutatavatel programmidel, kuid toimivad see-eest kiiremini ja väljastavad operatiivpersonalile vajalikku teavet. Operatiivjuhtimisel kontrollitakse ennekõike elektrivõrgu jooksvat seisundit pinge, voolu ning aktiiv- ja reaktiivvõimsusvoogude lubatavuse (etteantud piirides püsimise) seisukohalt. Kontrollida on vaja ka võimsuslülitite asendit (võrgu skeemi) ja trafoastmeid. Saabuvate seisundite kohta on vaja püstitada mitmesuguseid hüpoteese, veendumaks süsteemi töökindluses võimalike häiringute ja muutuste olukorras. Nähakse ette vajalikud meetmed pinge, sageduse ja vahetusvõimsuse reguleerimiseks. Arvutustes lähtutakse talitluse plaanitud väärtustest, võttes arvesse jooksvat seisundit.

Elektrisüsteemi talitluse arvutamiseks ja hindamiseks kasutatakse tänapäeval arvutusprogramme. Levinumateks on *PSS/E*, *DigSilent*, *Power World Simulator*, *PSCAD*, *CAPE* jt. Arvutatakse nii püsi- kui dünaamilisi talitlusi, lühisvoole ning määratakse releekaitse sättesuureid.

Levinuimaks elektrivõrgu püsitalitluse ja dünaamikaprotsesside modelleerimise vahendiks nii võrguettevõtetes kui teadus- ja uurimisasutustes on USA päritolu programmipakett *PSS/E* (*Power System Simulation for Engineers*). Pakett koosneb programmides, mis võimaldavad imiteerida, analüüsida ja optimeerida elektrisüsteemi talitlust. *PSS/E* põhifunktsiooniks on püsitalitluse arvutamine ja sellega seotud analüüsid, nagu talitluskindluse ja tundlikkuse analüüs, võrgu ekvivalenteerimine, dünaamiline imiteerimine, sümmeetriliste ja asümmeetriliste rikete ja lülituste analüüs. Võimalik on analüüsida süsteemi töökindlust ja süsteemi aeglast dünaamilist talitlust. Programmipaketti saab juhtida interaktiivselt või rakendada pakettjuhtimist. Interaktiivsel juhtimisel valitakse toimingud graafilisse liidesesse kuuluvate akende ja dialoogide vahendusel. Andmeid sisestatakse kas andmebaasi failidest või sõrmistiku abil. Pakettjuhtimine toimib eelnevalt koostatud käsufailide ja makrode abil. Programmi põhilisteks sisendandmeteks on elektrisüsteemi pärijärgnevusparameetrid, vajadusel ka vastu- ja nulljärgnevusparameetrid. Talitluse dünaamika arvutusteks on vaja andmeid elektrimasinate impedantside ja inertsikonstantide kohta ning kiirusregulaatorite andmeid. *PSS/E* rakendab võrguvõrrandite lahendamisel hõredate maatriksite käsitlemise meetodeid. Kasutusel on Gaussi-Seideli, modifitseeritud Gaussi-Seideli, Newtoni-Raphsoni ja lõhestatud Newtoni-Raphsoni meetodid. Püsiseisundeid võib arvutada alternatiivsetes olukordades, mis tekivad liinide või trafode sisse- või väljalülitumistega ning koormuste ja genereerivate võimsuste või muude talitlustingimuste muutustega. Talitluse dünaamika modelleerimisel on võimalik vaadelda erinevaid häiringuid, nagu lühised, taaslülitused lühisele, generaatorite väljalülitumised,

mootorite käivitamine, ergutuse kadumine jm. Lühiste arvutus põhineb sümmeetriliste komponentide meetodil ja seda käsitletakse kui püsitalitluse arvutuse laiendust. Kasutatakse ära püsitalitluse arvutuseks koostatud pärijärgnevusmudel, mida täiendatakse süsteemi vastu- ja nulljärgnevusparameetritega. Programmipaketi lisamooduliks on *PSS/OPF*, mida rakendatakse elektrisüsteemi optimaalse talitluse arvutamiseks.

Järjest enam populaarust kogub Saksa päritoluga programmipakett *DIgSILENT Power Factory*. *DIgSILENT* võimaldab uurida mitmesuguseid elektrivõrgu protsesse. Püsitalitluse arvutuste (võimsusvoogude arvutamine, häiringukindluse analüüs, *OPF* jm) kõrval saab teha dünaamika arvutusi (staatilisest stabiilsuse hindamine jm), lühiseprotsesside analüüse, töökindluse hindamist, elektromagnetiliste siirdeprotsesside arvutusi, relekaitse koordinatsiooni ja imitatsiooni jm. Eriti väärtuslikuks teeb programmipaketi sobivus hinnata tuuleelektrijaamade ja hajatootmise mõju elektrisüsteemile. Programmipakett sisaldab ainulaadseid elektrituulikute mudeleid. Elektrituulikute kõrval on võimalik modelleerida päikesepatareisisid, kütuseelemente ja mikroturbiine. Võimalik on selgitada võimsusvoogude ümberjagunemisest tingitud pingelange ja modelleerida asümmeetrilisi elektrivõrke.

Levinuimaks elektromagnetiliste siirdeprotsesside arvutamise programmiks on *PSCAD (Power Systems Computer Aided Design)*, mille esimene versioon anti välja 1993. aastal Kanadas. Programmipakett võimaldab vahelduvvooluahelate kõrval arvutada ja imiteerida ka *HVDC*- ja *FACTS*-seadmeid ning madalapingelisi jõuelektronikaseadmeid, erinevat tüüpi kontrollereid jm. Programmipaketti rakendatakse nii tootmisettevõtetes kui teadustöös. Rakendusala jaoks on elektromagnetiliste siirdeprotsesside modelleerimine, juhtimisautomaatika plaanimine, vahelduv- ja alalisvooluseadmete isolatsiooni koordinatsioon, releede testimine, jõuelektronikasüsteemide kavandamine ja testimine, subsünkroonse resonantsi uurimine, elektri kvaliteedi analüüs jm. Kasutusel on *PSCAD*-iga tihedalt seotud *E-TRAN (Translator for Power System Simulation)* programm, mis võimaldab *PSS/E* nõuete kohaselt koostatud ülesanded teisendada pakatile *PSCAD* arusaadavale kujule.

4.2.4 Püsitalitluse häiringuanalüüs

Kogu elektrisüsteemide eksisteerimise ajaloo vältel on olnud üks tähtsam probleem, kuidas kindlustada elektritoite katkematus. Nüüdisaegne ühiskond on elektrienergiast sedavõrd sõltuv, et ulatuslikumate elektrikatkestuste tagajärjed on võrreldavad loodusõnnetusega. Kuna elektrikatkestused tekivad suuremate või väiksemate häiringute tagajärjel, on nii elektrisüsteemi projekteerimisel kui käidu plaanisel ja realiseerimisel olnud esmaseks nõudeks tagada elektrivarustuse töö- ja talitluskindlus.

Elektrisüsteemi talitluskindluse all mõistetakse süsteemi võimet vastu seista ettenägematutele, kuid tõenäolistele häiringutele vähimate toitekatkestustega ja vähima kvaliteedi halvenemisega. Häiringu all mõistetakse siin elektrisüsteemi mõne põhielemendi – elektriliini, trafo või generaatori – väljalülitumist. Tähele tuleb panna ka väiksemaid häiringuid, näiteks elektrisüsteemi koormuse ettenägematut kasvu.

Arengu plaanimisel analüüsitakse elektrisüsteemi töökindlust (*reliability*), s.o elektrisüsteemi võimet täita elektrivarustuse ülesandeid pika aja vältel (nt aasta jooksul) võimalikult väheste katkestustega. Talitluskindlust võib käsitada kui töökindluse analoogi jooksval käidul. Omaette mõiste on häiringukindlus (*security*), mis osutab elektrisüsteemi võimele säilitada normaalitalitus teatud häiringu korral. Töökindluse analüüsil on teada süsteemi konfiguratsioon ja tema elementide avariide jaotusseadused. Arengu plaanimine seisneb elementide (generaatorite, elektriliinide, trafode) lisamises või elektrivõrgu skeemi muutmises, et tagada töökindlusnõuete täitmine. Kuna plaanitakse ennetavalt, on meetmete rakendamiseks piisavalt aega. Talitluskindluse analüüs seisneb seevastu süsteemi haavatavuse hindamises võimalike häiringute korral reaalajas. Kuna süsteemi käidutingimused erinevad alati varem plaanituist remondivajaduste, avariiliste väljalülitumiste ja koormuse muutumise tõttu, on süsteemi käit ja süsteemi talitluskindlus pidevas muutumises. Talitluskindluse tõstmiseks saab rakendada kiiresti toimivaid meetmeid (võimsuste ümberjaotamine, operatiivreservi kasutuselevõtt, abi naabersüsteemidest jms).

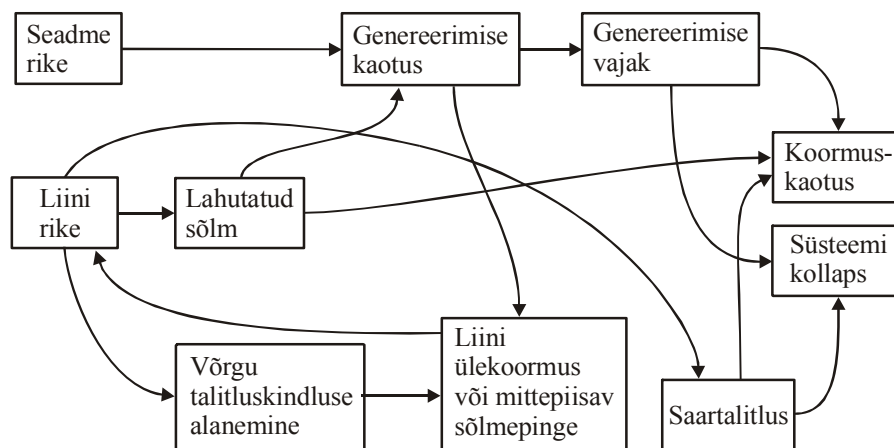
Elektrisüsteemi struktuur ja käit peavad tagama, et ka kõige ebasoodsamate talitlushäiringute tagajärjel ei tekiks süsteemis juhitamatut, kaskaadselt laienevat elektrikatkestust. Enamasti nõutakse, et elektrisüsteemi töö säiliks vähemalt siis, kui lülitub välja üks oluline genereeriv või ülekandeelement. Seda nõuet nimetatakse n–1 kriteeriumiks.

Veendumaks, et elektrisüsteemi talitus ei ole häiringute tagajärjel hädaohus, tuleb uurida süsteemi seisundeid generaatorite, kompensaatorite, liinide ja teiste elementide väljalangemise korral. Joonisel 4.5 on illustreeritud elektrisüsteemi elementide rikete tagajärgi. Püsitalitluse häiringuanalüüsi (*contingency analysis*) eesmärk on ennustada püsiseisund, mis kujuneb välja pärast selliseid sündmusi (häiringuid) nagu elektriliini, trafo või generaatori väljalülitumine. Väljalülitumine võib olla

- kavatsuslik, s.t tahtlik lülitamine (remondi otstarbel, võimsuste jagunemise või pingekorraldamiseks vms)

- sundlülitumine (ülekoormuse korral, et vältida elemendi vigastusi, või automaatselt rikete puhul).

Sõltumata väljalülitumise iseloomust ja põhjusest on dispetšeril vaja teada selle mõju talitlusele. Kergem on olukord ettekavatsetud väljalülitamiste puhul, siis on väljalülitatav element teada ning piisab ainult selle väljalülitamise mõju analüüsist. Sundväljalülitumised toimuvad ootamatult ning seetõttu tuleb häiringukindluse analüüsil vaadelda kõikvõimalike väljalülitumiste tagajärgi. Sundväljalülitamiste tõenäosused on väikesed ja sõltuvad ilmastikust. Kuna suurema tõenäosusega toimuvad ühekordsed väljalülitumised, siis üldjuhul piirduakse nende analüüsiga. Siiski on rasketes ilmastikuoludes võimalik ka mitme elemendi üheaegne väljalülitumine, eriti kaheahelaliste liinide puhul. Tavaliselt piirduakse raskete ilmastikutingimuste korral kuni kahekordsete häiringutega.



Joonis 4.5. Rikete tagajärgi.

Püsitalitluse häiringuanalüüs taandub püsiseisundite arvutusele. Analüüsi põhivahenditeks on püsiseisundi arvutuse kiired meetodid. Kasutusel on ka püsiseisundi ülikiired arvutusmeetodid, mis põhinevad alalisvoolumudelil. Vaatamata meetodite efektiivsusele nõuab häiringute arvestamine siiski mahukaid arvutusi. Näiteks tuleb 300 sõlme ja 500 haruga võrgu häiringukindluse analüüsil töödelda umbes 500 väljalülitumise (häiringu) juhtumit. Isegi kui ühe juhu töötlemine nõuab 0,5 sekundit, on häiringuseeria töötlemise aeg 250 sekundit ehk umbes 4 minutit. Arvutusaja vähendamiseks tuleb piirata vaadeldavate häiringute hulka ja ka häiringukindluse analüüsi sagedust.

Häiringute hulka võib piirata käsitsi või automaatselt. Käsitsi piirab dispetšer. Nimelt pole kõik häiringud kriitilised. Tavaliselt teab süsteemi dispetšer kogemuste põhjal hästi, millised potentsiaalsed häiringud võivad põhjustada raskusi. Seega võib ta piirata analüüsitavaid häiringute hulka mõistliku väärtuseni. Siiski säilib oht, et kogemused pole piisavad eriti võrgu

konfiguratsiooni või koormuste struktuuri hiljutiste muutuste puhul. Kindlam ja objektiivsem oleks automaatne häiringute valiku protseduur.

Üheks automaatse valiku võimaluseks on tunduvalt kiirem alalisvoolumudel, et välja sõeluda häiringud, mille puhul võimsusvood ei ületa kriitilisi piire. Kriitilistele juhtumitele rakendatakse täpsemat vahelduvvoolu analüüsi. Teiseks levinud mooduseks on häiringute reastamine toimeindeksite (*performance index*) suuruse järgi. Toimeindeksid hindavad häiringute tõsidust. Toimeindeksitena kasutatakse kõige enam

$$J = \sum_i (U_i - U_{iN})^2 w_k$$

$$J' = \sum_k \left(\frac{P_k}{P_k^+} \right)^2 w_k$$

kus U_i – i -nda sõlme pinge

U_{iN} – i -nda sõlme nimipinge

P_k – k -nda haru aktiivvõimsusvoog

P_k^+ – suurim lubatud aktiivvõimsusvoog harus k

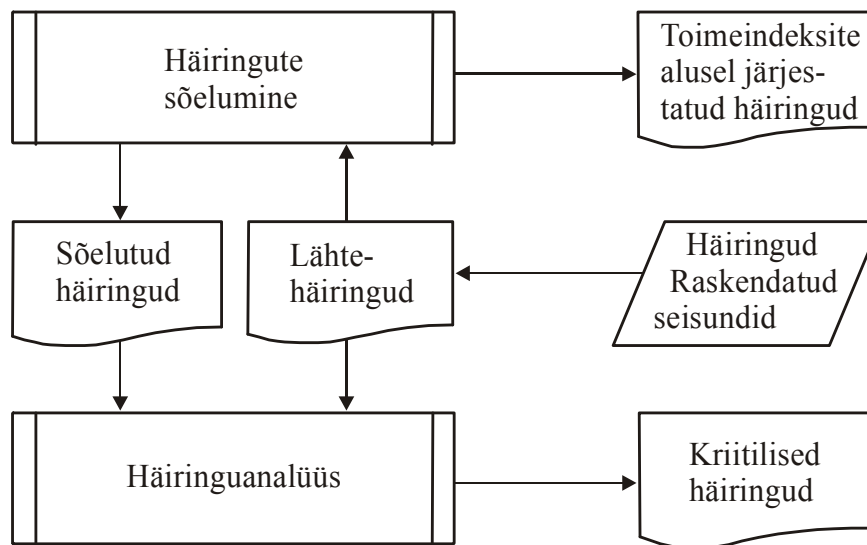
w_i, w_k – kaalutegurid, mis on seotud pinge või võimsusvoo kõrvalekaldega või suhtelise tähtsusega sõlmes i või harus k .

Loodud on efektiivsed meetodid toimeindeksite muutuste hindamiseks erinevate häiringute puhul. Täpsemalt analüüsitakse ainult neid häiringuid, mille toimeindeks ületab kriitilise piiri.

Firma Siemens talitluse tugisüsteem *SINAUT Spectrum* sisaldab joonisel 4.6 esitatud häiringukindluse hindamise (*contingency evaluation*) toimingut, kus alul sõelutakse häiringutest toimeindeksite alusel välja need, mis võivad osutada ohtlikeks (*contingency screening*), ja seejärel analüüsitakse igat juhtumit nende häiringukindluse seisukohalt (*contingency analysis*).

Tavaliselt on elektrisüsteem ühendatud teiste süsteemidega. Normaalselt avaldab häiring süsteemis tugevat mõju süsteemile endale. Siiski on juhtumeid, kus naabersüsteemi häiring on süsteemis tuntav. Välissüsteemi häiringute mõju on raske ette ennustada, kuna välissüsteemi seire on üldjuhul puudulik. Seisundi estimeerimise tõttu on antud süsteemi võrgutopoloogia, sõlmede pinge, koormus ja genereerivad võimsused reaajas teada. Väliste süsteemide kohta on sidustalitluses teada vaid vahetusvõimsused, peamiste liinide ja generaatorite staatus ja võib-olla ka üksikute elektrijaamade toodang. Ühendsüsteemi häiringueelse seisundi määramiseks oleks vaja teada kogu ühendsüsteemi püsiseisundit. Kuna aga väliste süsteemide sei-

sund pole täies ulatuses teada, tuleb teha lähendusi, mis on põhiliselt kahte tüüpi: ühed põhinevad tundlikkuse analüüsil, teised välise süsteemi ekvivalenteerimisel.

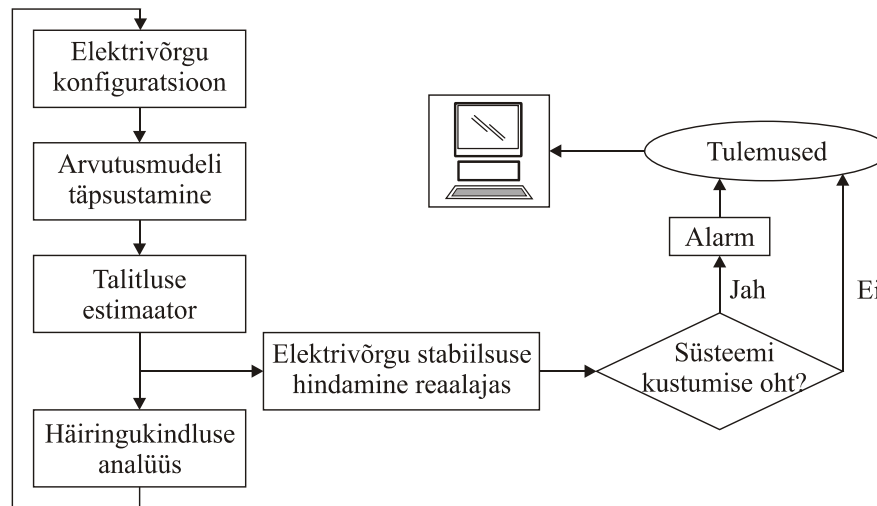


Joonis 4.6. Elektrisüsteemi häiringukindluse analüüs.

4.2.5 Talitluskindluse hindamine reaalajas

Elektrituru dereguleerimine sunnib elektrivõrke talitlema nende läbilaskevõime lähedal. Viimastel aastatel toimunud süsteemiavariid USA-s ja Euroopas on esile tõstnud vajaduse talitluskindluse hindamiseks jooksvalt reaalajas. Elektrisüsteemi koormatavuse ja elektrivõrkude läbilaskevõime jooksev hindamine võimaldavad kasutusele võtta ennetavaid meetmeid süsteemi stabiilsuse säilitamiseks. Vältida tuleb olukordi, mis võivad viia stabiilsuse kaotuseni. Jälgitakse nii nurga- kui pingestabiilsust ning võimalikku saartalitluse tekkimist, mis võib seada ohtu ka sageduse stabiilsuse.

Elektrivõrgu dispetšisüsteem (SCADA) skaneerib perioodiliselt mõõteandmeid ja seadmete seisundeid. Tüüpiline skaneerimisaeg on 1...2 s generaatoritele ja vahetusvõimsustele ning võimsuslülite asenditele, 2...15 s liinivõimsustele ja pingetele ning 15 minutit energia väärtustele. Joonisel 4.7 on skeem reaalajaandmete võimalikust ärakasutamiseks talitluskindluse jooksvalt hindamisel. Esmalt estimeeritakse mõõteandmed. Seejuures täpsustatakse võrguvõrganditega esitatud arvutusmudelit, ennekõike elektrivõrgu konfiguratsiooni (topoloogiat). Järgneb häiringuanalüüs ja stabiilsuse hindamine reaalajas. Tõsi, termin reaalajas viitab sellele, et jooksvald andmeid käsitletakse enne järgmiste mõõteandmete saabumist, s.o 1...2 sekundi jooksul. Tegelikult toimub nii häiringuanalüüs kui stabiilsuse hindamine perioodiliselt ajavahemikus, mis võib ulatuda minutitesse. Reaalajatoimingute asemel on seetõttu õigem rääkida sidustoimingutest (*Online*-toimingutest).



Joonis 4.7. Elektrisüsteemi talitluskindluse jooksev hindamine.

Põhilised kriteeriumid, mida reaajas jälgitakse, kuuluvad pingestabiilsuse juurde. Kuna aga pingestabiilsus ja nurgastabiilsus on tihedalt seotud, puudutavad need ühtlasi ka nurgastabiilsust. Efektiiwsed kriteeriumid võib moodustada laimõõtmiste alusel. Teatavasti seisnevad laimõõtmised selles, et süsteemi eri punktides mõõdetakse voolu ja pingestabiilsuse faasoreid, mis ajamärgendiga varustatuna saadetakse ühtsesse kontsentraatorisse, mis selgitab muuhulgas välja faasoritevahelised nurgad. Need on eriti olulised stabiilsuse varu hindamisel. Oluline on elektrivõrgu koridoride (*power corridor*) talitluse seire, kus märgatavaid võimsusi kantakse pikade vahemaade taha.

Pingestabiilsuse seisukohalt on kõige olulisemad need toimingud, mis mõjutavad koormust, nagu trafode astmelüliteid juhtimine ja koormuse väljalülitamine. Trafode astmelüliteid võib vajaduse korral blokeerida, viia varem kindlaks määratud asendisse või piirata nende pingesätteid. Elektrivõrgus võib astmelüliteid olla mitmel tasemel, näiteks ülikõrgepinge ja kõrgepinge ning kõrgepinge ja keskpinge tasemete vahel. Vajalik oleks astmelüliteid tsentraliseeritult koordineerida, mis võib osutada keerukaks. Astmelüliteid blokeerimise mõju võivad vähendada koormuse taastumise muud mehhanismid.

Koormuse avariiline vähendamine vajalikus kohas ka suhteliselt lühikeseks ajaks on väga efektiivne vahend pingestabiilsuse vältimiseks. Pinge lühiajalise mittestabiilsuse ärahoidmiseks peab koormust piirama kiiresti, mitte enam kui 1,5 sekundi jooksul selleks, et vältida asünkroonmootorite vääratumist. Koormuse vähendamise üheks võimaluseks on nende mootorite väljalülitamine, mille pingestabiilsus on madal. Tööstuses ongi asünkroonmootorid varustatud minimaalpingekaitsega. Seda ei saa aga öelda väikeste mootorite kohta, mis toimivad näiteks õhukonditsioneerides. Sellised mootorid võivad vääratuda, jäädes siiski võrku lülita-

tuks, mis voolu tõusmise tõttu alandavad pinget veelgi. Koormuse piiramisel pinge pikaajalise stabiilsuse säilitamiseks tuleb arvestada järgmisi asjaolusid:

- eesmärgiks on talitluse pikaajalise tasakaalupunkti loomine, mis vastasel juhul võib puududa
- koormuse piiramine peab toimuma kiiresti, sest mida pikem on aeg, seda enam langeb pinge ja seda enam peab koormust vähendama
- koormuse kiire vähendamine võib ära hoida elektriliinide väljalülitumise ülekoormuse tõttu või distantskaitse toimest, samuti generaatorite lülitused rootorivoolu ülekuumenemise tõttu
- erinevalt koormuse sagedusjärgsest piiramisest on oluline väljalülitatava koormuse asukoht.

Koormuse avariiline vähendamine põhineb enamasti pinge ebanormaalsel alanemisel või reaktiivvõimsuse vastaval tõusmisel. Vältida tuleb koormuse mittevajalikke väljalülitamisi. Väljalülitused peaksid toimuma mõne sekundi jooksul pärast häiringut, olgugi et pikaajaline mittestabiilsus ilmneb tunduvalt pikemal ajavahemikul.

Nüüdisajal kasvab süsteemikaitse tähtsus. Süsteemikaitse moodustavad seadmed, mis peavad vältima stabiilsuse kaotuseni viivaid olukordi. Traditsiooniliste koormuse sagedus- ja pingejärgsel vähendamisel ja muudele kaitseviiside kõrval on päevakorral laimõõtmiste (*WAMS*) edasiarendamine laijuhtimissüsteemideks (*WACS*). Laimõõtmised sobivad hästi kiirete juhtimisseadmete nagu *PSS*- ja *FACTS*-seadmete seadistamiseks. Juhtida võib elektrisüsteemi muid regulaatoreid ning teha vajalikke lülitusi. Teisisõnu, tegemist on elektrisüsteemi laikaitsega (*Wide Area Protection, WAP*). Automaatselt võib reguleerida ka elektrisüsteemi püsitalitlust, hoides ära avariiotlike olukordade tekkimise.

Laikaitse ja ülekandvõrgu pingereguleerimise ühendamisel räägitakse pinge tavalise ehk primaarreguleerimise kõrval veel pinge sekundaar- ja tertsaarreguleerimisest. Primaarreguleerimise aluseks on generaatorid. Sekundaarregulaatorid (*Secondary Voltage Regulation, SVR*) reguleerivad pinget juhtimispiirkondade kontrollsõlmedes. Tertsaarreguleerimine (*Tertiary Voltage Regulation, TVR*) tähendab sekundaarregulaatorite sätete muutmist üle kogu süsteemi. Nii *SVR* kui *TVR* rakenduvad ohuolukordades. Reguleeritakse ja lülitatakse kondensaatorpatareisid, reaktoreid, sünkroon- ja staatilisi kompensaatoreid, aga ka trafode astmelüliteid. Vajaduse korral astmelülitid blokeeritakse. Tertsaarreguleerimine algab, kui sekundaarreguleerimisest (*SVR*) ei piisa. Kui ka *TVR* ei tule toime, hakkab tööle pinge laikaitse-

teem *WAP*. Laikaitseüsteemi võimalusteks on sisse lülitada reaktiivvõimsuse reserve, kui neid on, ning vähendada piirkonna koormust, alustades reaktiivkoormusest. Koormust vähendatakse seni, kuni *SVR* ja *TVR* kontrollsuurused sisenevad oma normaalsesse piirkonda.

4.2.6 Energia tootmise ohjamine

Püsiseisundite arvutamisel on peale võrguparameetrite ja sõlmede aktiiv- ja reaktiivkoormuste ette antud ka juhitavad parameetrid (elektrijaamade aktiivvõimsused ning pinged generaator-sõlmedes ja tugisõlmes, samuti trafode ülekandesuhted). Ette ei anta neid aga meelevaldselt. Esmaseks tingimuseks on seisundi lubatavuse kindlustamine (kõigi kitsenduste täitmine). Kuid parameetrite lubatud piirkonnas jääb nende väärtuste valikuks küllalt lai diapason. Seetõttu tuleks valik teha näiteks võrgukadude miinimumi või summaarsete tootmiskulude miinimumi või mõne kombineeritud kriteeriumi järgi, mis kajastab tootmiskulusid, töökindlust ja arvestab keskkonnakaitsega.

Traditsiooniliselt lähtutakse ennekõike majanduslikust võimsuste ökonoomse jagunemise kriteeriumist. Sellisel lähenemisel arvestatakse genereerivate võimsuste kitsendusi ja aktiivvõimsuskadusid, ignoreeritakse aga pinge ja võimsusvoogude kitsendusi. See tähendab, et tegemist on optimeerimise ühe lihtsa erijuhuga – aktiivvõimsuste staatilise (antud seisundi) optimeerimisega. Staatilise optimeerimise üldjuhtum oleks seisundi kompleksne optimeerimine kõigi juhitavate parameetrite (genereeritavate aktiiv- ja reaktiivvõimsuste, pinge, trafode ülekandesuhte) järgi. Selline ülesanne on keerukas ja suure töömahuga, mistõttu see lahendatakse kahes etapis – esimesel etapil optimeeritakse aktiivvõimsust, teisel etapil aga reaktiivvõimsusi, pinge ja trafode ülekandesuhteid. Seda allülesannet nimetatakse elektrivõrgu püsiseisundi optimeerimiseks.

Tunduvalt keerukam on dünaamiline ülesanne, s.t optimeerimine üle teatud perioodi. Siin tuleb arvestada selliseid aspekte nagu

- agregaatide optimaalne koosseis
- soojus- ja hüdroagregaatide töö koordineerimine
- elektri ja soojuse koostootmine
- remontide optimaalne plaanimine.

Iga toodud probleemi lahendamiseks on omad ajaintervallid:

- agregaatide koosseisu optimeerimisel 48...72 tundi
- soojus- ja hüdrojaamade töö optimeerimisel päev, nädal, kuu, aasta
- remontide optimeerimisel 1...3 aastat.

Optimeerimisülesannete ajaline hierarhia on tabelis 4.4.

Tabel 4.4. Optimeerimisülesannete ajaline hierarhia.

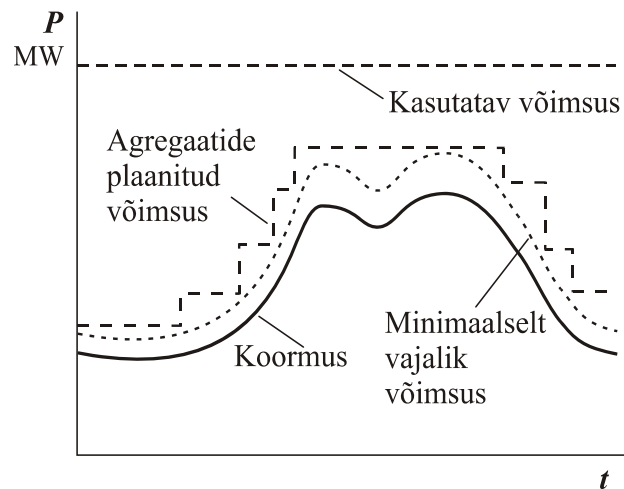
Ajanivoo	Juhtimisülesanne	Eesmärk
Sekundid	Võimsuste automaatreguleerimine	Tagada õige sagedus ja vahetusvõimsused
Minutid	Võimsuste jagunemise ja pinge ning trafode ülekandesuhete optimeerimine	Minimeerida tootmiskulud või muud näitajad (saaste määr)
Tunnid	Agregaatide koosseisu optimeerimine, hüdro- ja soojusjaamade koordineerimine	Minimeerida tootmiskulud või muud näitajad
Päevad, nädalad	Hüdro- ja soojusjaamade koordineerimine	Minimeerida tootmiskulud või muud näitajad
Kuud	Remontide optimeerimine, vahetusvõimsuste plaanimine	Minimeerida tootmiskulud, arvestades töökindlust
Aastad	Remontide optimeerimine, tootmise ja vahetusvõimsuste plaanimine	Minimeerida tootmiskulud ja investeeringud, arvestades töökindlust

Viimasel ajal muudab talitluse plaanmist oluliselt energeetikamajanduse dereguleerimine ja elektri hajatootmine, s.t elektriturg ja tuuleelektrijaamad. Vabal elektriturul on elektri genereerimine, ülekanne, jaotamine ja tarne üksteisest lahutatud. Genereerimine ja tarne on täielikult allutatud turu reeglitele. Ülekanne ja jaotamine, mis kujutavad loomulikke monopole, on kohustatud elektrituru toimimist toetama. Võib siiski väita, et elektrisüsteemi talitluse plaanamise ja juhtimise füüsikalised alused pole muutunud. Vaid osa toimingutest on siirdunud elektriturul osalejate haldusesse. Ometi on vaja muuta seniseid talitluse plaanamise meetodeid ja vahendeid.

Püsiseisundi optimeerimine on vaid üks elektrisüsteemi talitluse plaanamise aspektidest. Üldjuhul tuleb leida veel agregaatide optimaalne koosseis, koordineerida soojus-, hüdro- ja koostootmisjaamade tööd, plaanida remonte. Seejuures leitakse parim lahendus dünaamiliselt teatud perioodi kohta, kuna nii energiaressursside kasutamisel kui agregaatide sisse- ja väljalülitamistel on integraalsetest piirangutest ja muudest asjaoludest tingitud pikaajaline järelmõju. Oluliselt mõjutab talitluse plaanmist elektriturg, mis välistab elektrienergia tootjate otsese koostöö või vähemalt muudab selle vorme. Allpool vaatleme talitluse plaanamise küsimusi ennekõike traditsiooniliselt, sest see kajastab probleemi füüsikalist sisu, mida ühes või teises vormis tuleb arvestada ka elektriturul.

Elektrisüsteemi koormuse muutumine tingib vajaduse muuta ööpäeva vältel töösolevate agregaatide koosseisu. Tipptundideks tuleb peaaegu kõik agregaadid töösse lülitada ja öötundideks on otstarbekas liigsed agregaadid seisata. Siit tuleneb agregaatide töökorra optimeeri-

mise (*unit commitment*) ehk agregaatide optimaalse koosseisu määramise ülesanne. Joonisel 4.8, kus kõnealust ülesannet on illustreeritud, on ära näidatud ka reservi vajadus.



Joonis 4.8. Töösolevate agregaatide võimsuse muutumine ööpäeva kestel.

Talitluse plaanimisel tuleb ette näha töötavate agregaatide koosseis, nende sisse- ja väljalülitamise ajad. Agregaadid lülitatakse sisse, et kindlustada vajalik reserv. Väljalülitamine on majandusliku kokkuhoiu kõrval vajalik ka agregaatide minimaalselt lubatud koormuse tõttu. Minimaalse koormuse nõue johtub näiteks kavitatsiooni probleemidest hüdroagregaatides ja katelagregaatide stabiilse toimimise tagamisest soojusjaamades. Kui elektrijaama töösolevate agregaatide võimsus on tehnilise miinimumi lähedal, siis puudub jaamal koormuse allaregulermise võimalus. Agregaatide käivitamiseks kuluv aeg erineb. Hüdroagregaatide võib sünkroniseerida võrguga mõne minuti pärast. Gaasiturbiinid vajavad kümnekond minutit, traditsioonilised soojusagregaadid mõni tund ja tuumaagregaadid kümneid tunde.

Töötavate agregaatide koosseisu on optimaalselt valida keerukas. Agregaatide sisse- ja väljalülitamisel tuleb arvestada täiendava kütusekuluga, seadmete kiirema vananemisega ja ka tööjõuga. Optimeerimisel seatakse eesmärgiks minimeerida elektrijaama kütusekulu teatud perioodi (nt mõne ööpäeva) jooksul, mis peale agregaatide koosseisu sõltub nende koormatavusest. Agregaatide töökorra optimeerimise ülesande keerukuse tingib koosseisu variantide suur arv. Näiteks 12 katlaga ühise aurumagistraaliga elektrijaamas on kuue töötava katla puhul võimalike kombinatsioonide arv juba ühes ajaintervallis ligi 1000. Nende seast parima valiku tegemiseks tuleb iga võimaliku koosseisu jaoks määrata optimaalne koormusjaotus ning sellele vastav summaarne kütusekulu ja nii pikema aja jooksul. Seejuures tuleb järgida tehnilisi piiranguid:

- kui agregaat on töösse lülitatud, ei tohi seda kohe välja lülitada

- kui agregaat on seisatud, võib seda käivitada alles teatud aja pärast
- ühes elektrijaamas ei ole korraga võimalik käivitada mitut agregaat.

Matemaatiliselt kujutab agregaatide töökorra valik endast diskreetse optimeerimise ülesannet, mille alamülesandeks on koormusjaotuse optimeerimine agregaatide etteantud koosseisu juures. Kasutusel on erinevad meetodid, nagu prioriteetide meetod, dünaamilise programmeerimise meetod jt. Lihtsaim on prioriteetide meetod, millega määratakse kindlaks reeglid agregaatide käivitamiseks ja seiskamiseks. Optimaalsed prioriteedid võib esimeses lähenduses määrata kütuse erikulu järgi. Esimesena tuleb käivitada agregaat, millel on minimaalne kütuse erikulu, seejärel teine jne. Agregaadid seisatakse vastupidises järjekorras. Töötavatest agregaatidest tuleb esimesena koormata seda, mille kütusekulu suhteline juurdekasv ehk kütuse marginaalkulu on kõige väiksem. Agregaaadi seiskamisel muutub tema kütusekulu nulliks. Töötavad agregaadid peavad aga koormust suurendama ja nende kütusekulu kasvab. Seega on agregaat kasulik seisata, kui tema kütusekulu on suurem kui süsteemi kütuse marginaalkulu. Seejärel korrigeeritakse kirjeldatud viisil määratud agregaatide koosseisu, arvestades käivituskulusid ja vajalikku reservi elektrisüsteemis.

Hüdrojaamade talitluse plaanimisel arvestatakse, et hüdroagregaaadi poolt genereeritav võimsus sõltub turbiini läbivast vooluhulgast, vee rõhust ja agregaaadi kasutegurist

$$P = 9,81 \times H \times Q \times \eta \quad (\text{kW})$$

kus H – survekõrgus m,

Q – vooluhulk m^3/s ,

η – kasutegur.

Sama veehulgaga saab seda enam energiat, mida suurem on survekõrgus. Lisaks sõltub ka kasutegur nii vooluhulgast kui survekõrgusest.

Hüdrojaamu on otstarbekas rakendada kui reguleerivat ning tipu- ja reservvõimsust, arvestades, et baasvõimsuse annavad soojus- ja tuumajaamad. Kuna hüdroagregaatidel käivituskulud praktiliselt puuduvad, sobivad nad selleks otstarbeks hästi. Piiravateks asjaoludeks on juurdevoolava vee hulk ning vee tase ülemises ja alumises veehoidlas (ülemises ja alumises bjeffis). Hüdrojaama efektiivsus on üldjuhul seda suurem, mida suurem on veehoidla maht. Hüdrojaamade kaskaadi korral tuleb jaamade töö kooskõlastada. Hüdrojaama alaliigiks on pump-elektriijaam (hüdroakumulatsioonijaam), kus, kasutades ülemist ja alumist veehoidlat, pumbatakse vett tsükliliselt üles või genereeritakse elektrienergiat. Pumpjaamad on vajalikud näiteks tuumajaamade ühtlase töö tagamiseks. Muidugi määrab hüdrojaamade kasutusviisi üldjuhul

elektriturg.

Elektrisüsteemi talitlust plaanitakse aasta, kuu, nädala ja ööpäeva kaupa. Aasta talitluse plaanimisel määratakse elektrijaamade aastatoodangud ja vajalikud ressursid, hüdroelektrijaamade pikaajalised koormusgraafikud, pikaajalised elektri ostu-müügilepingud ja koostöölepingud naabersüsteemidega, remondi- ja reservigraafikud, elektrivõrgu skeemid, releekaitse ja automaatikaseadmete sätted jm. Põhilisteks lähteandmeteks on süsteemi koormuse, kütuse- ja energiaturu ning veeressursside prognoosid. Kuu, nädala ja ööpäeva kaupa neid plaane korrigeeritakse ja detailiseeritakse täpsustatud prognooside alusel.

Elektri genereerimise arendamine ja plaanimine ei toimu vabal turul siiski anarhiliselt, vaid allub riiklikule (poliitilisele) regulatsioonile. Riik annab litsentse uute elektrijaamade ehitamiseks ning määrab energiapoliitika: uute elektrijaamade vajaduse ja ehitamise tähtsajad, kasutatava kütuse liigi, elektri hajustootmise ja taastuvate energiaallikate ulatuse jm. Muidugi allub uute jaamade ehitamine ja käit turumajanduse reeglitele, kus eesmärgiks on investeringute võimalikult suur kasumlikkus.

Ka elektri ülekandmise mahud ja ajalised muutused määrab esimeses lähenduses elektriturg, mis peab muidugi arvestama elektri ülekandmise võimalusi. Sellistele kommertsiaalsetele elektrivoogudele lisandub olulisel määral füüsikalisi vooge, mis on tingitud Kirchhoffi seadustest, genereerivate ja ülekandeseadmete rikestest, tuulejaamade võimsuse muutustest jms. Ülekandevõrkude tööd plaanitakse teadaolevate (arvatavate) genereerivate allikate põhjal. Siin peetakse eriti silmas aastast koormusmaksimumi, mis põhjamaades on talvel, lõunapoolsetes maades aga kliimaseadmete tõttu ka suvel. Oluline on teada koormust võrgu sõlmede kaupa. Unustada ei tohi reaktiivkoormust.

Kuna elektri ülekandevõrgud ja süsteemiteenused jäävad ka vabal elektriturul monopoolseteks, arendatakse neid riikliku kontrolli all (Eestis Konkurentsiamet). Kuigi elektrituru osapooled on elektri ülekandevõimalustest ja jaotamise tingimustest otseselt huvitatud, ei tee nad selleks vajalikke investeringuid. Elektrivõrkude arendamise eest hoolitsevad võrguettevõtted vahendite arvel, mis laekuvad vastavatest tasudest. Kuna võrgutasude määr on poliitikute kontrolli all, siis võib siin tekkida vastuolu. Nii põhjendataksegi süsteemsete avariide teket nii Euroopas kui Ameerikas muuhulgas elektri ülekandeseadete mitteküllaldase arendamisega.

Elektrivõrke arendatakse kahel moel. Ühelt poolt uute elektriliinide ja alajaamade rajamise või olemasolevate rekonstrueerimise teel, teisalt uute releekaitse- ja automaatikaseadmete paigaldamisega. Näiteks hinnatakse elektri ülekandevõime tõusuks uute *FACTS*-seadmete

kasutuselevõtu tagajärjel sageli kuni 30%, mis võib majanduslikult olla küllaltki oluline. Tuleb siiski aru saada, et selline ülekandevõime tõus saavutatakse talitlemisega elektriülekanne stabiilsuse piiril. Paratamatult tõuseb siis risk sattuda avariilukorda näiteks nende seadmete rikke korral. Elektri töökindlaks edastamiseks on siiski vajalikud piisava võimsusega jõuseadmed (liinid, trafod jm).

Kokku võttes tuleb tõdeda, et elektrisüsteemide arengu ja talitluse plaanimisel on tegemist vastandlike nõudmistega, nagu elektrivarustuse töökindlus ja kvaliteet, ökonoomsus ning ökoloogia. Tegemist on multikriteeriaalse ülesandega, kus tuleb teha kompromisse ja vältida ülemääraseid vastuolusid (konflikte).

4.3 Elektrisüsteemi stabiilsus

Stabiilsuse all mõistetakse elektrisüsteemi võimet jätkata normaalset tööd pärast talituse häiringuid. Eristatakse sünkroonset (nurga-) ja pingestabiilsust. Võimalik on ka sageduse mittestabiilsus. Süsteemi võimet jätkata tööd pärast väikesi häiringuid nimetatakse staatiliseks stabiilsuseks, pärast suuri häiringuid (lühised, põhielementide kommutatsioon jm) dünaamiliseks stabiilsuseks. Väikeste häiringute põhjustatud mittestabiilsus võib avalduda nii talitlusparameetrite sujuva, aperioidilise kui ka võnkuva, perioodilise muutusena. Suured häiringud põhjustavad süsteemi generaatorite võnkumist, mis võib kas sumbuda või lõppeda sünkroonse töö lakkamisega. Elektrisüsteemi stabiilsuse klassifikatsioon on joonisel 4.9.

Sünkroonset stabiilsust on võimalik illustreerida lihtsaima elektrisüsteemi näitel. Lihtsaim elektrisüsteem koosneb ühest ekvivalentsest generaatorist (elektrijaamast), ülekandeseadmetest ja lõpmata võimsast energiast vastuvõtvast elektrisüsteemist, mida iseloomustab konstantne pinge U . Sellise süsteemi jaoks on lihtne tuletada seos

$$P = \frac{EU}{x} \sin \delta$$

kus P – ülekantav võimsus

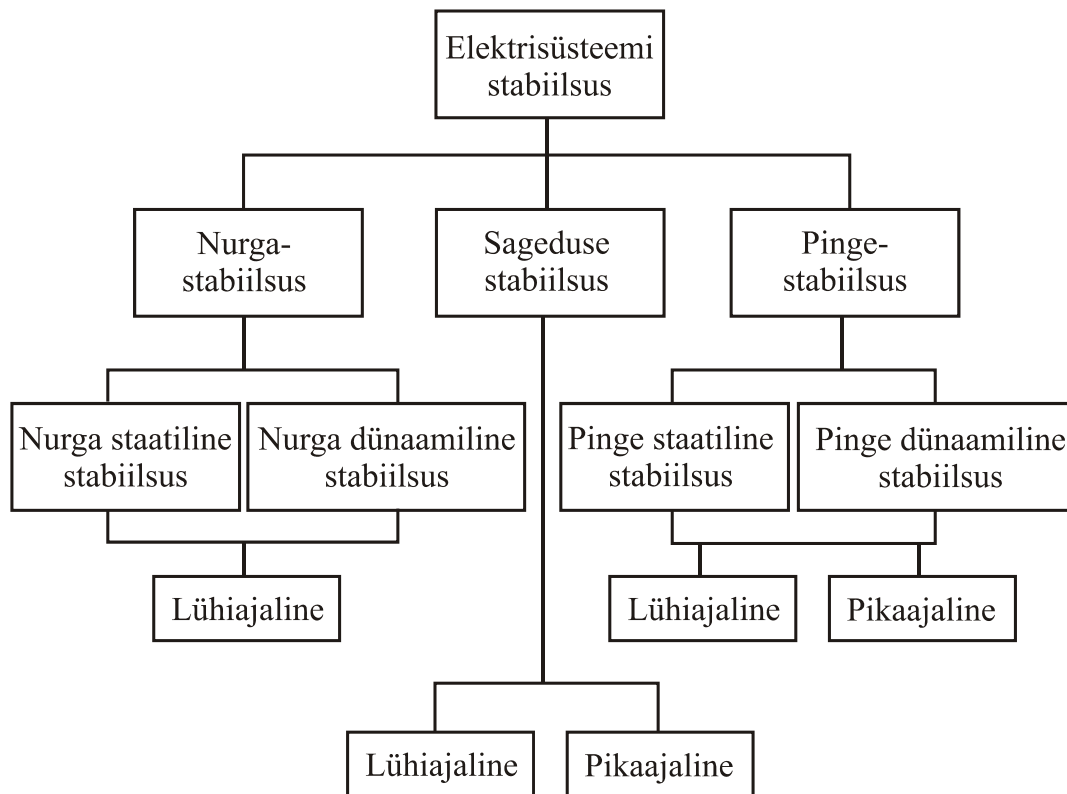
E – generaatori elektromotoorjõud

x – summaarne reaktiivtakistus (aktiivtakistusi ei arvestata)

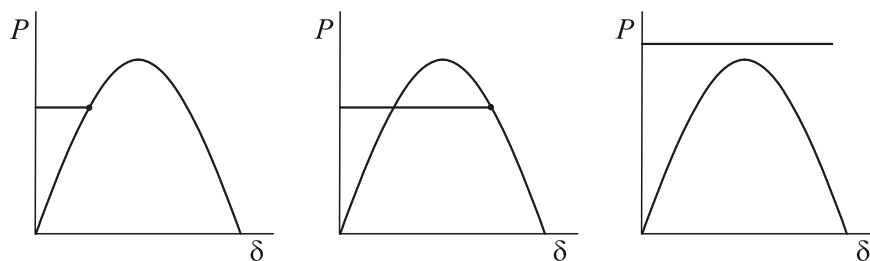
δ – elektromotoorjõu ja pinge vaheline nurk.

Kui elektromotoorjõud lugeda konstantseks (puudub automaatne ergutuse reguleerimine), annab esitatud seos sõltuvuse $P = f(\delta)$ nurkkarakteristiku sinusoidina. Kui samas teljestikus vaadelda ka generaatori karakteristikut, mis ei sõltu nurgast, saab kaks võimalikku tasakaalu- ehk tööpunkti. Kolmandaks võimaluseks on tööpunkti puudumine (joonis 4.10). On lihtne

näidata, et stabiilne on vaid vasakpoolne tööpunkt, kus $\delta < 90^\circ$.



Joonis 4.9. Elektrisüsteemi stabiilsuse klassifikatsioon.



Joonis 4.10. Võimalikud tulemused lihtsaima elektrisüsteemi seisundi määramisel.

Tulemusi saab üldistada ka keerukale elektrisüsteemile, kus nagu lihtsaimaski süsteemis võib esineda kolm olukorda:

- seisund on olemas (saab arvutada) ja stabiilne
- seisund on olemas, kuid mittestabiilne
- seisund puudub.

Praktiliselt arvutatakse keeruka süsteemi seisund mittelineaarse võrrandisüsteemi (võrguvõrrandite) lahendamise teel iteratiivselt. Kui seisund puudub, siis iteratsioonid ei koonu. Lahendi leidumise korral ei ole siiski kindel, kas see on stabiilne, teisisõnu, kas selline seisund

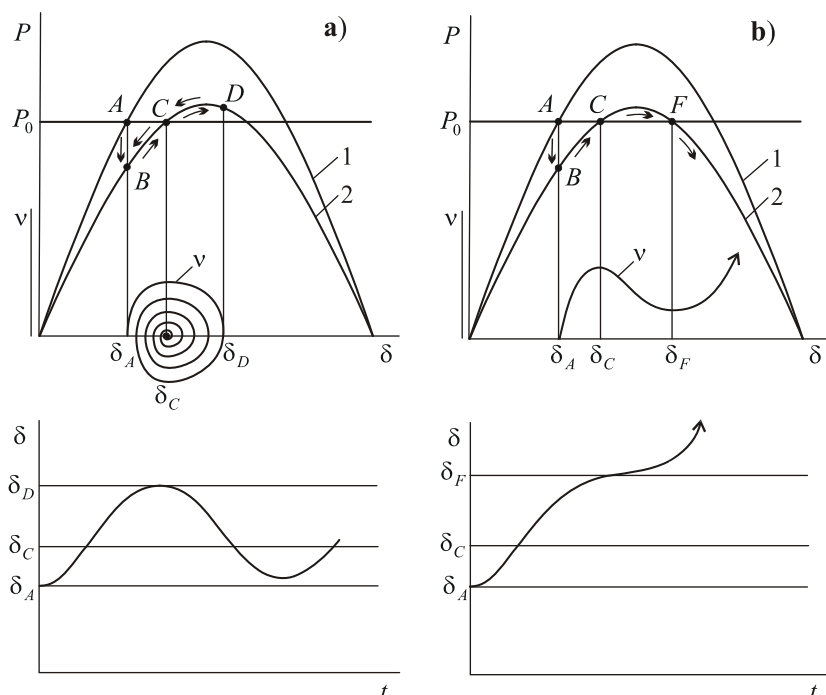
on realiseeritav. Põhimõtteliselt on võimalik ka, et elektrisüsteemi talitluse suhteliselt aeglase muutumise (nt koormuse tõusu) tõttu jõutakse seisundini, mis ei ole stabiilne ja elektrisüsteemi sünkroonne töö katkeb.

Dünaamilist stabiilsust võib lihtsaimas elektrisüsteemis vaadelda olukorras, kus häiringu tulemusena summaarne takistus suureneb ja nurkkarakteristiku amplituud vastavalt väheneb. Kuna elektromotoorjõu suund ühtib generaatori rootori põikteljega, ei saa nurk δ rootori inertsiga tõttu hüppeliselt muutuda. Tekib siirdeprotsess, mis sumbub või lõpeb generaatori sünkronismist väljalangemisega (joonis 4.11).

Näites vastab lähteseisund tööpunktile A karakteristikul 1 (joonis 4.11a). Häiringu tulemusena suureneb hüppeliselt süsteemi takistus ja nurkkarakteristik 1 asendub madalama karakteristikuga 2. Mehaaniline inertsi ei lase nurgal δ hetkeliselt muutuda ja seega saab uueks tööpunktiks punkt B . Siin on generaatori elektriline võimsus väiksem kui mehaaniline võimsus P_0 (turbiini võimsus jääb muutumatuks), mille tõttu generaatori rootor kiireneb ja nurk δ hakkab kasvama. Vastavalt nihkub ka tööpunkt punktist B punkti C poole. Punktis C on elektriline ja mehaaniline võimsus tasakaalus, kuid rootori inertsiga tõttu nurga suurenemine jätkub, elektriline võimsus saab omakorda suuremaks mehaanilisest ja rootori suhteline kiirus v hakkab vähenema. Mõnda aega on see kiirus veel positiivne (rootor pöörleb kiiremini kui staatori magnetväli) ja nurga suurenemine jätkub. Punktis D muutub rootori liikumise suhteline kiirus nulliks. Kuna kiirendus on endiselt negatiivne, sest elektriline võimsus ületab mehaanilise võimsuse, siis muutub kiirus negatiivseks, nurk δ hakkab vähenema ja tööpunkt nihkub tagasi punkti C . Kuna punktis C ei saa tööpunkt rootori inertsiga tõttu taas peatuda, jätkub liikumine lähtepunkti B suunas. Liikumine peatub sedapuhku punktis B ja kogu protsess kordub. Tekib perioodiline protsess, milles mehaaniliselt võngub generaatori rootor ja muutuvad elektrilised parameetrid (võimsus, vool, generaatori pinged jm). Elektrilised ja mehaanilised kaod summutavad selle protsessi teatud aja (mõni sekund) möödudes ning saabub püsiseisund, mis vastab tööpunktile C . Seega on tegemist stabiilse siirdeprotsessiga.

Vaatleme nüüd olukorda, kus turbiini võimsus P_0 on veidi suurem (joonis 4.11b). Esialgu kulgeb siirdeprotsess analoogiliselt vaadelduga – positiivne jääkvõimsus (mehaanilise ja elektrilise võimsuse vahe) kiirendab rootorit, tööpunkt liigub punktist B punkti C ja sealt rootori inertsiga tõttu edasi. Kuna rootori kiirenemine on nüüd suurema jääkvõimsuse tõttu intensiivsem, pidurdumine aga nõrgem, siis võib juhtuda, et liikumine jätkub punktini F ja edasi. Punktis F muutub jääkvõimsuse ja seega ka rootori kiirenduse märk taas positiivseks ning

nurga δ kasv jätkub nüüd pidurdamatult. Seega võib tõdeda, et antud tingimustes on siirdeprotsess mittestabiilne (generaator langeb sünkronismist välja).



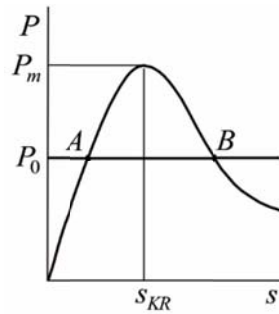
Joonis 4.11. Elektrisüsteemi stabiilne (a) ja mittestabiilne (b) siirdeprotsess.

Keerukas elektrisüsteemis, mis sisaldab mitu elektrijaama (ekvivalentset generaatorit), on stabiilne töö võimalik, kui generaatorite rootoritevaheline nurk ei muutu liiga suureks, ei ületa näiteks 180° . Kui häiringu tulemusena tekkinud siirdeprotsessis generaatorite rootorid liiguvad nii, et nendevaheline maksimaalne nurk jääb piiratuks, siis on siirdeprotsess stabiilne, vastasel juhul aga mitte.

Pinge stabiilsuse üheks alaliigiks on asünkroonkoormuse stabiilsus. Asünkroonmootori karakteristikku võib esitada võimsuse P ja libistuse s funktsioonina (joonis 4.12). Samas teljestikus saab näidata ka töomasina karakteristikut. Nagu lihtsaima elektrisüsteemi puhul saab jällegi kaks tööpunkti, millest vaid vasakpoolne on stabiilne. Karakteristiku maksimum avaldub seosega

$$P_m = \frac{U^2}{2(x + x_v)}$$

kus x on mootori ja x_v väline (mootori ja konstantse pingega lattide vaheline) takistus. Kuna tegemist on ruutsõltuvusega, põhjustab toitepinge U mõningane vähenemine maksimaalvõimsuse tunduva langemise. Selles olukorras võib uus tööpunkt hoopiski puududa ja mootor seiskub.



Joonis 4.12. Asünkroonmootori karakteristik.

Üldjuhul seondub pingestabiilsusega terve rida olukordi, mida on illustreeritud joonisel 4.13. Vaatleme lähemalt pingestabiilsusega seotud ilminguid. Kui võrgupinge mingil põhjusel langeb (nt pikaajalisel lühisel), siis asünkroonmootorid pidurdavad ja nende reaktiivvõimsustõuseb. Tagajärjeks on pinges edasine langus ja teiste asünkroonmootorite pidurdumine, mis võib lõppeda kõikide asünkroonmootorite seiskumisega ja pinges kollapsiga. Negatiivselt mõjuvad siin ka reaktiivvõimsust kompenseerivad kondensaatorid, mille võimsus muutub proportsionaalselt pinges ruuduga. Seega väheneb pinges langemisel järsult nende võimsus.

Pinge dünaamiline stabiilsus			Pinge pikaajaline stabiilsus		
<u>Asünkroonmootorite dünaamika</u>			<u>Koormuste juurdekasv</u>		
<u>Gen ergutusüsteemide dünaamika</u>		<u>Trafode astmelülitid</u>			
<u>Turbiinide regulaatorid</u>			<u>Termostaatiline koormus</u>		
<u>Kondensaatorpatareid ja reaktorid</u>		<u>Ergutuse piiramine</u>	<u>Gaasiturbiinide käivit</u>		
<u>Koormuse alapingekaitse</u>			<u>Elektriijaamade operatiivpersonal</u>		
<u>Staat reaktiivvõimsuse allikad</u>			<u>Sageduse reguleerimine</u>		
<u>Gen elektromeh dünaamika</u>		<u>Katelde dünaamika</u>	<u>Liinide/trafode ülekoorm</u>		
<u>Alalisvooluülekanne</u>			<u>Süsteemi dispetšer</u>		
<u>Releekaitse, sh ülekoormuskaitse</u>					
0,1 sek	1 sek	10 sek	1 min	10 min	1 tund

Joonis 4.13. Pinges stabiilsuse olukordi.

Avarii vältimiseks varustatakse asünkroonmootorid alapingekaitsega, mis osa mootoreid pinges tunduval langemisel välja lülitab, võimaldades võrgupinget taastada. Pinges langus vähendab ka võimsust, mida elektrisüsteemi allsüsteemide vahel üle kantakse. Võimsusdefitsiidis allsüsteemis põhjustab see sageduse langust. Kui sagedusautomaadid osa koormusest välja ei lülita (nt ei reageeri madala pinges tõttu), kaob sünkroonne stabiilsus. Olukorda raskendab sageduse vähenemisest tingitud elektriijaama katelde toitepumpade ja sellest põhjustatud ka

turbiinide võimsuse langemine. Kirjeldatud protsessi kestus on umbes 10 sekundit. Eespool kirjeldatud siirdeprotsess võib kulgeda edukalt (ei põhjusta mittestabiilsust), kuid oht pole veel möödas. Kui genereeritav reaktiivvõimsus on häiringu tagajärjel oluliselt langenud (elektrijaama või ülekandeliini väljalülitamise tõttu), on ka koormuse pingetase madal ja trafode astmelülitid püüavad seda taastada. Kuna pingetaseme tõus on võimalik üksnes reaktiivvõimsuse kasvu arvel, on tulemuseks generaatorite ülekoormumine. Mõne aja pärast rakenduvad ülekoormuskaitse (sh ergutussüsteemi ülekoormuskaitse), genereeritav reaktiivvõimsus väheneb ning tulemuseks on pinge kollaps, mis releekaitse ja muu automaatika toime tõttu võib haarata vaid osa elektrisüsteemist. Kogu protsess kestab mõni minut. Kui elektrisüsteemi koormuse või ülekantava võimsuse juurdekasv on kiire näiteks hommikuse või õhtuse tippkoormuse ajal, põhjustab see reaktiivvõimsuse defitsiiti, mis nõuab süsteemi dispetšeri sekkumist (täiendavate reaktiivvõimsuse allikate sisselülitamist, koormuse osalist väljalülitamist). Mõne aja möödudes (kümnekond minutid) lülituvad ülekoormatud liinid ja trafod välja ning tulemuseks on süsteemiavarii. Negatiivselt mõjuvad siin ka seadmed, mis püüavad säilitada energiat (nt termostaatilised seadmed). Pinge progressiivne langus võib olla seotud nurgastabiilsusega ka, et sünkroongeneraatorite rootorite vahelise nurga suurenemisel pinge süsteemi elektrilises keskpunktis langeb, osutudes nulliks, kui vektorite vaheline nurk on 180° . Tavaliselt eraldab vastavad süsteemiosad süsteemikaitse. Kui seda ei juhtu, hakkab pinge elektrilises keskpunktis pulseerima. Ülaltoodud näidetes oli tegemist suhteliselt aeglase protsessidega. Kiiremates protsessides, mis vältavad 1...10 sekundit, mängib olulist osa generaatorite rootorite võnkumine. Seejuures ei õnnestu sünkroonset stabiilsust ja pinge stabiilsust enamasti eraldada, vaid olukorda tuleb käsitleda kui energiasüsteemi ühtset dünaamilist protsessi.

Elektrisüsteemi stabiilsuse tagamine algab süsteemi projekteerimise ja talitluse pikaajalise plaanimise järgus. Nii mõjub suur genereeriva võimsuse (ka reaktiivvõimsuse) reserv positiivselt kõikidele stabiilsuse liikidele. See on aga kõige kulukam stabiilsuse tagamise moodus. Ka kõrge pingeniivo hoidmine süsteemis on soodne nii sünkroonse stabiilsuse kui pinge stabiilsuse seisukohalt. Kõige efektiivsemad vahendid stabiilsuse tagamiseks on automaadid. Esmane roll staatilise stabiilsuse tagamisel on ergutuse reguleerimisel tugevatoimeliste regulaatoritega ja nn elektrisüsteemi stabilisaatoritega (*PSS*). Kiiretoimeline releekaitse on otsustava tähtsusega dünaamilise stabiilsuse tagamiseks. Efektiivsed on türistorjuhtimisega piki- ja põiklülituses kondensaatorite ja reaktorite regulaatorid. Sellised jõuelektroonikal baseeruvad türistorjuhitavad kompenseerimisseadmed (*FACTS*) on eriti perspektiivsed elektrisüsteemi

ülekandevõime tõstmisel.

Mainitud abinõud on mõeldud ennekõike sünkroonse stabiilsuse tõstmiseks. Samad vahendid mõjuvad soodsalt ka pinge stabiilsusele, seda enam, et neid stabiilsuse liike on sageli raske üksteisest eraldada. Pinge stabiilsusega seotud aeglaste protsesside juhtimiseks (muuhulgas operatiivpersonali poolt) on järgmised vahendid:

- Mobiilseks aktiivvõimsuse reserviks on hüdro- ja gaasiturbiinid, mis normaaltalitluses on välja lülitatud. Nende kiire käivitamine (mõne minuti jooksul) avariolukorras väldib pinge kollapsi.
- Reaktiivvõimsuse reserv on oluline pinge stabiilsuse tõstmise vahend. Kasutada võib nii mehaaniliselt kui elektroonselt juhitavaid kondensaatorpatareisid ning staatilisi reaktiivvõimsuse allikaid. Oluline on hoida reaktiivvõimsuse reservi generaatoritel, kus see on efektiivselt reguleeritav. Probleemiks on, kuidas vältida staatori ja rootori ülekoormuskaitse mittesoovitavat (stabiilsuse seisukohalt enneaegset) tegevust.
- Trafode astmelülitite mõju sõltub sellest, kuhu astmelülitid kuuluvad. Kõrgepingetraafode astmelülitid säilitavad kõrget pingeniivood ja ka pinge stabiilsust. Jaotusvõrgu trafode astmelülitid püüavad häiringu tõttu langenud koormuse pinget aga tõsta, suurendades põhivõrgus ülekantavat aktiiv- ja reaktiivvõimsust, mis omakorda kiirendab pinge alanemist. Selle tõttu on jaotusvõrgu trafode astmelülitid soovitatav põhivõrgu pinge languse ajaks blokeerida.
- Alalisvooluülekanne, kuigi see tekitab ka stabiilsuse probleeme, võib teisalt olla stabiilsuse tagamise vahend. Kui süsteemis on näiteks aktiivvõimsuse defitsiit, võib aktiivvõimsust alalisvooluülekanne kaudu kiiresti lisada. Reaktiivvõimsuse defitsiidi korral saab aga ülekantavat võimsust vähendada, mis vabastab alalisvooluülekannega seotud reaktiivvõimsuse allikad. Alalisvooluülekanne võivad olla regulaatorid, mis püüavad summutada võnkumisi ja pinge muutusi vahelduvvooluvõrgus. Igal juhul ei edasta alalisvooluülekanne teises süsteemis esinevaid talitlushäiringuid.

Koormuse juhtimine, mis seisneb tarbijate osalises väljalülitamises alapingekaitse või operatiivpersonali poolt, on nii tehniliselt kui majanduslikult tõhus. Kuigi see põhjustab toitekatkestusi, võib väljalülitatavad tarbijad valida nii, et kahju oleks minimaalne. Näiteks elekterkütte, kliimaseadmete jms 5...10 minutiks väljalülitamine ei too kaasa negatiivseid tagajärgi. Teisalt on selline aeg piisav, et teha vajalikke ümberkorraldusi süsteemi talitluses.

4.4 Sageduse ja pinge reguleerimine

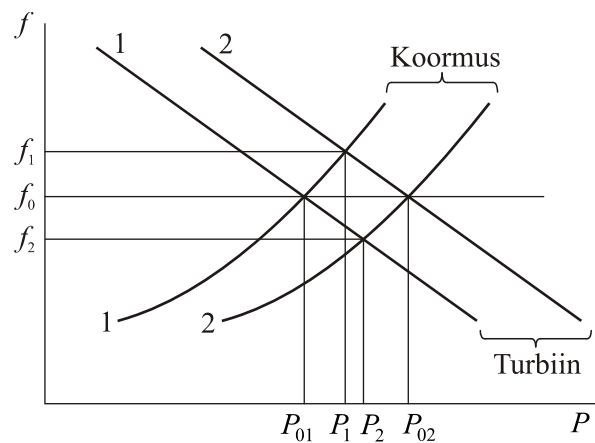
Elektrienergia tootmine ja tarbimine peavad igal ajahetkel olema tasakaalus. Tasakaalu rikumine, mis võib olla tingitud tarbitava energia (elektrisüsteemi koormuse) muutustest või genereeritava ja ülekantava võimsuse avariilisest vähenemisest, avaldub elektrisüsteemi sageduse kõrvalekaldena. Kui koormus süsteemis tõuseb, siis põhjustab genereeritava ja tarbitava võimsuse vahe kineetilise energia vähenemist ja generaatorite pöörlemiskiiruse ja sellega võrdeliselt ka sageduse langust. Genereeritava võimsuse ülekaal põhjustab seevastu sageduse tõusu.

Võimsuse tasakaal saavutatakse enamasti genereeritava võimsuse reguleerimise teel. Avariitalitluses, kus genereeritava võimsuse vajak võib olla suur, on võimalik vähendada (välja lülitada) ka koormust. Põhimõtteliselt võib koormust vähendada ka normaaltalitusel juhtudel, kui see on majanduslikult soodsam genereeritava võimsuse tõstmisega võrreldes.

Elektrienergia tootmise ja tarbimise tasakaalu kindlustamine algab juba elektrisüsteemi tööplaanimisel päevadeks ja nädalateks ette. Vabal elektriturul peavad kõik elektriturul osalejad, nii tootjad kui tarbijad, tagama enda elektrienergia jooksva bilansi. Toimingud elektriturul lõpevad enne järjekordset kasutustundi. Kasutustunni ajal hoolitseb elektrienergia tasakaalu ja sageduse vajaliku väärtuse eest süsteemioperaator (*Transmission System Operator, TSO*). Sellekohaste automaatide ja süsteemioperaatori toimingud vajaliku sageduse kindlustamiseks moodustavadki sageduse reguleerimise.

Sageduse ja seega ka pöörlemiskiiruse muutumisele reageerivad ennekõike turbiinide kiirusregulaatorid, mis muudavad auru või vee juurdevoolu ning ühtlasi turbiini ja generaatori võimsust. Kuna süsteemis töötab korraga suur hulk turbiine, siis vältimaks nende kooskõlastamata reguleerimist, seadistatakse kiirusregulaatorid tööle statismiga (kaldkarakteristiku järgi). Oma osa on ka koormuse sõltuvusel sagedusest. Kokku võttes kujuneb sagedus süsteemis joonisel 4.14 toodud karakteristikute lõikepunkti järgi (joonisel f tähistab sagedust ja P võimsust). Tarbimise kasvades nihkub koormuse karakteristik asendist 1 asendisse 2. Karakteristikute uus lõikepunkt vastab nüüd sagedusele f_2 , mis on madalam kui esialgne sagedus f_0 . Kuigi genereeriv võimsus tõusis, ei kindlusta selline sageduse primaarreguleerimine, milles põhimõtteliselt osalevad süsteemi kõik turboagregaadid, sageduse püsivat väärtust. Lisaks on vajalik sageduse sekundaarreguleerimine, mis genereeritava võimsuse täiendava lisamise teel nihutab süsteemis turbiinide summaarset karakteristikut asendisse 2 nii, et uus lõikepunkt vastab esialgsele (nimi)sagedusele. Seega on sageduse taastamiseks koormuse kasvu korral

süsteemis vajalik reserv $P_R = P_{02} - P_{01}$.



Joonis 4.14. Turbiini ja koormuse sageduskarakteristikud.

Sageduse reguleerimine on tihedalt seotud vahetusvõimsuste reguleerimisega ühendsüsteemis. Mitmel põhjusel (liinide läbilaskevõime, riikidevahelised kokkulepped jm) on alamsüsteemidevaheline vahetusvõimsus ette määratud. Kui sageduse reguleerimine põhjustab plaanitud vahetusvõimsuste hälbeid, tuleb vahetusvõimsusi korrigeerida genereeritava võimsuse ümberjaotamisega nii, et sagedus ei muutuks. Näiteks kui ühes alamsüsteemis genereeritav võimsus avariiliselt väheneb, tekib seal võimsuse defitsiit, mille naabersüsteemid automaatselt korvavad. Selle alamsüsteemi ülesanne on tõsta enda genereeritav võimsus endisele tasemele. Veelgi enam, mingi ajavahemiku vältel peab genereeritav võimsus selles alamsüsteemis olema isegi kõrgem, korvamaks vahepeal saadud lisaenergiat. Seega peab vahetusvõimsuse reguleerimisel olema nii proportsionaalne kui integraalne toime. Ka kirjeldatud vahetusvõimsuste reguleerimine kuulub sageduse sekundaarreguleerimise juurde.

Võimalused sageduse reguleerimiseks eeldavad võimsuste reservi. Oluline on nii reservi kasutatav võimsus kui selle aktiveerimise aeg. Sekundaarreguleerimiseks vajaliku võimsusreservi tagamist (nt 15 minutit ette) nimetatakse sageduse tertsiarreguleerimiseks. Võimalik on veel elektrilise aja reguleerimine ühendsüsteemis, mis tagab, et sageduse keskmine väärtus vastab nimisagedusele. Kokku võttes kujunevad toimingud sageduse reguleerimiseks joonisel 4.15 esitatud sarnaseks.

Primaarreguleerimisel reageerivad sageduse hälbele Δf turbiinide kiirusregulaatorid, muutes genereerivat võimsust ΔP_G

$$\Delta P_G = -K(f - f_0) = -K\Delta f$$

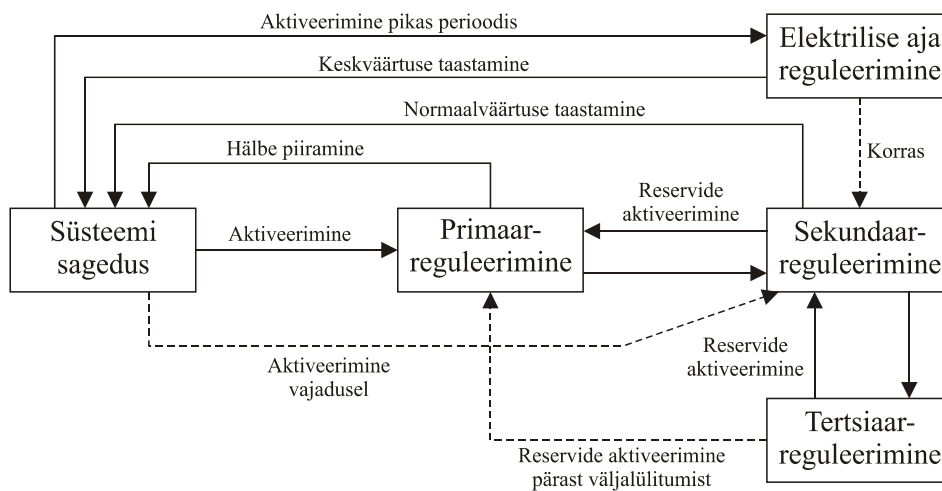
Siin on tegur K sagedustundlikkus (*regulating energy*), mõõtühikuna MW/Hz, ja f_0 sageduse sättesuurus, mis tavaliselt võrdub nimisagedusega f_n . Suhtelistes ühikutes

$$\Delta P_G = -\frac{1}{\sigma} \frac{\Delta f}{f_n} P_n$$

kus $\sigma = 1/K$ on süsteemi (pöörlemiskiiruse) statism (*speed droop*), mille väärtuseks on enamasti 4...5%. Süsteemi koormuse sõltuvust sagedusest võib samuti lugeda lineaarseks

$$\Delta P_K = \lambda_K \Delta f$$

kus $\lambda_K = dP_K / df$ on koormuse reguleeriv efekt, suhtelistes ühikutes 1...2%.



Joonis 4.15. Sageduse reguleerimise toimingud.

Kuna süsteemi võimsuse hälve avaldub kujul $\Delta P = \Delta P_G - \Delta P_K$, siis

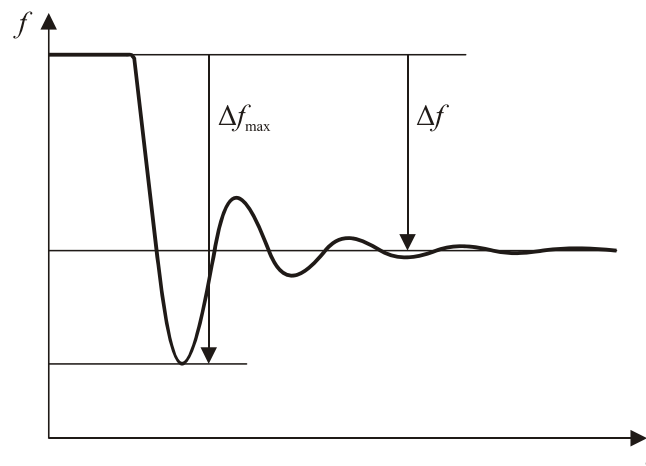
$$\Delta f = \frac{\Delta P}{\sum_{i=1}^n K_i + \lambda_K} = \frac{\Delta P}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i} \frac{P_{ni}}{f_n} + \lambda_K}$$

Arvesse on võetud, et genereeriva võimsuse summaarne sagedustundlikkus moodustub üksikute turbiinide tegurite summast, mis osalevad sageduse reguleerimises. Süsteemi sagedustundlikkuse moodustab valemi nimetaja

$$\lambda = \sum_{i=1}^n K_i + \lambda_K = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i} \frac{P_{ni}}{f_n} + \lambda_K$$

Lääne-Euroopa sünkroonala (*UCTE*) sageduse reguleerimisel moodustab võimalik võimsuse hälve ning ühtlasi vajalik (kuum)reserv $\Delta P = 3000$ MW ja süsteemi sagedustundlikkus $\lambda = 18000$ MW/Hz .

Süsteemi sagedus ei muutu generaatorite inertsitõttu hetkega. Joonisel 4.16 on illustreeritud sageduse kõrvalekalde siirdeprotsessi. Siin on Δf_{\max} sageduse maksimaalne hälve ja Δf kvaasistatsionaarne hälve. Sageduse hälbimine ja taastumine sõltub turbiini reguleerimiskiirusest ja koormuse muutumise kiirusest. Sageduse siirdeaeg on enamasti 10 sek suurusejärgus.



Joonis 4.16. Sageduse siirdeprotsess.

Primaarreguleerimine ei taga süsteemis veel sageduse ettenähtud (nimi)väärtust. Samuti ei pruugi primaarreguleerimise tulemusel tekkinud kvaasistatsionaarses talitluses alamsüsteemide vahetusvõimsused olla plaanitud tasemel. Sageduse nimiväärtuse ja vahetusvõimsuste taastamiseks on vajalik sekundaarreguleerimine. Sünkroonselt talitlevas ühendsüsteemis (*synchronous area*) tegeletakse sageduse sekundaarreguleerimisega piirkondade (*control area*) või ka suuremate piirkondade reguleerimisplakkide (*control block*) kaupa (joonis 4.17). Eesmärgiks on minimeerida (nullida) piirkondlik reguleerimisviga (*Area Control Error, ACE*).

$$ACE_i = \beta_i \Delta f + \Delta P_{Ti}$$

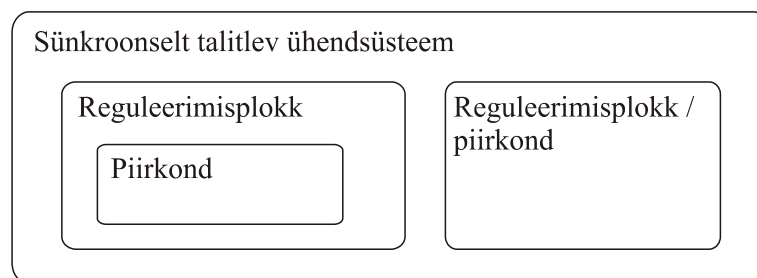
kus β_i – sagedustegur

Δf – sageduse hälve

ΔP_{Ti} – vahetusvõimsuste summaarne hälve.

Sageduse sekundaarreguleerimise ja vahetusvõimsuse reguleerimise automaate käsitletakse kui ühtset genereeriva võimsuse automaatjuhtimise (*Automatic Generation Control, AGC*)

kompleksi. Sekundaarreguleerimises peavad osalema ennekõike piirkonnad, kus võimsuste ebabalanss on tekkinud. Piirkondlikud reguleerimisparameetrid kooskõlastatakse kogu sünkroonpiirkonna ulatuses. Sekundaarreguleerimine vabastab ühtlasi primaarreguleerimiseks vajaliku reservi. Sekundaarreguleerimine, nii nagu primaarreguleeriminegi, on pidev protsess, seda eriti koormuste muutumise tõttu. Sageduse taastamisel talitlushäiringute järgselt tekib perioodiline siirdeprotsess, mille võnkeperiood on 3...5 sek. Sellised võnkumised võivad ohustada süsteemi stabiilsust, kui sekundaarreguleerimises osalevad hüdrojaamad. Lääne-Euroopa sünkroonpiirkonnas on sekundaarreguleerimise ajakonstant 50...200 sek.



Joonis 4.17. Ühendsüsteemi piirkonnad.

Sagedust reguleeritakse, nii nagu kogu ühendsüsteemi talitlust juhitakse, reguleerimisplakkide kaupa. Reguleerimisplaki ulatuses võib sekundaarreguleerimine toimuda

- tsentraalselt, kus kogu ploki kohta on üks regulaator; reguleerimisplakk ühtib reguleerimispiirkonnaga
- mitmeselt, kui regulaatorid on kõigis piirkondades, kusjuures üks piirkond tasakaalustab ka kogu ploki talitlust
- hierarhiliselt, kui reguleerimises osalevad kõigi piirkondade regulaatorid, kuid juhtiv regulaator koordineerib muude regulaatorite toimimist.

Lääne-Euroopa sünkroonpiirkonnas tuleb normatiivide kohaselt sagedus taastada 15 minuti jooksul võimaliku jääkhälbe ± 20 MHz piiridesse. Elektrilise aja normaliseerimises osalevad kõik reguleerimispiirkonnad. Aega kontrollitakse süsteemi ühes keskuses ja vajadusel muudetakse piirkondlike sekundaarregulaatorite sätteid.

Sageduse sekundaarreguleerimine süsteemis IPS/UPS, kuhu kuulub ka Eesti, toimub Moskvas asuva tsentraalse regulaatoriga, mis juhib Volga kaskaadi hüdrojaamu. Selle tõttu ei ole Eestis vaja suhteliselt kiirelt toimivat reguleerimisreservi. Alamsüsteemides nõutakse siiski aeglasemat 3...30-minutilise aktiveerimisajaga reservi, mis Eesti kohta on 50 MW (2,9% maksimumvõimsusest). Selline reserv vastab põhimõtteliselt sageduse tertsaarreguleerimisele.

Sageduse primaar- ja sekundaarreguleerimine kompenseerivad sageduse hälbed suhteliselt kiiresti selleks ettenähtud võimsusreservi abil. Sageduse tertsiaarreguleerimine seisneb vajaliku reservi kindlustamises kümneid minuteid ette. Seejuures üritatakse optimeerida elektrisüsteemi talitlust niivõrd, kuivõrd see vabal elektriturul võimalik on. Vajaliku reservi leiab reguleeritult süsteemi dispetšer. Vajaduse korral hangitakse lisavõimsust elektribörsilt. Vajaliku reservi tagamise võimalused tertsiaarreguleerimisel:

- genereerivate allikate sisse- või väljalülitamine (nt gaasiturbiinid ja pumpelektrijaamad)
- sekundaarreguleerimises osalevate generaatorite ümberjaotamine
- vahetusvõimsuste muutmine
- koormuse ohjamine (nt muudetavate koormuste kaugjuhtimine).

Tertsiaarreguleerimises ei saa osaleda seadmed, mis

- vajavad pikka käivitusaja
- on remondis või hoolduses
- on kütuse- või veepiirangutega
- osalevad primaarreguleerimises.

Arvestada tuleb ka ülekandevõrgu piiranguid. Hajutatud elektritootmise arenedes tekivad analoogilised kohalikud sagedusprobleemid ka jaotusvõrgus, kuhu järjest enam liitub ka väikse võimsusega sünkroongeneraatoreid. See seab võrgu talitlushäirete korral täiendavad nõuded generaatorite eraldumisautomaatikale.

Pinge elektrivõrgus on lokaalse iseloomuga erinevalt sagedusest, mis püsitalitluses on kogu elektrisüsteemis sama. Pinge tase võrgu sõlmedes sõltub kohalikust reaktiivvõimsuse genereerimise ja tarbimise vahetusest. Reaktiivvõimsuse genereerimine elektrijaamades ja ülekandmine suurele kaugusele ei ole kadude tõttu majanduslikult otstarbekas. Ka nõuaks see pinge kõrget taset elektrijaama lähedal. Seevastu generaatorite ergutus ja ühtlasi reaktiivvõimsuse kiiretoimeline reguleerimine on olulise tähtsusega elektrisüsteemi stabiilsuse säilitamise seisukohalt.

Pinge reguleerimise eesmärkideks on:

- elektri kvaliteet. Pinge tase peab vastama plaanitud graafikule, kokkulepetele elektritarnijatega ja tehniliste piirangutega.
- elektrisüsteemi töökindlus. Genereerimise või ülekande rike ei tohi ohustada võrku. Pinge väärtused peavad olema tehniliselt lubatud piirides. Ülekoormuste vältimiseks peab pinge reguleerimise kohustus olema jaotatud seadmete vahel. Pinge reguleerimine peab tõstma

talitluse stabiilsust.

- talitluse ökonoomsus. Elektri tootmise ja ülekande kulud tuleb minimeerida.

Pinge reguleerimine on dünaamilise optimeerimise probleem väga erinevas ajaskaalas, alates sadadest millisekunditest talitluse järskude muutuste korral kuni mõne tunnini generaatorite käivitamisel või väljalülitamisel. Pinge reguleerimine eeldab hoolikat plaanimist nii ööpäevas, nädalas kui kuus. Vaja on leida seadmete parim koosseis ja moodustada pingegraafikud.

Pinge reguleerimise põhilisteks vahenditeks on generaatorid, sünkroon- ja staatilised kompensatorid, kondensaatorpatareid, reaktorid, trafode astmelülitid. Reguleerimissüsteemid haaravad üksikuid generaatoreid, elektrijaamu, regioone ja elektrivõrgu sõlmi. Reaktiivvõimsuse ja pinge reguleerimise efektiivsus saavutatakse genereerivate seadmete ja regulaatorite koordineerimise teel. Vajalik on hierarhiline reguleerimissüsteem, mis haarab kohalikku, regionaalset ja tsentraalset taset. Tulemuseks on pinge koordineeritud reguleerimissüsteem (*Coordinated Voltage Regulation, CVR*), mis seisneb primaarreguleerimise (*Primary Voltage Regulation, PVR*) kõrval sekundaarses (*SVR*) ja tertsiaarses (*TVR*) reguleerimises. Lisandub veel prognoositase. Mainitud kolm pinge reguleerimise taset on põhimõtteliselt sõltumatud nii ajas kui ruumis. See on vajalik selleks, et süsteem ei kujuneks liialt keerukaks, mis võib põhjustada reguleerimise mittestabiilsust. Esimesed kaks taset toimivad reaajas ja on enamasti automaatsed. Kolmas tase võib olla ka manuaalne. Prognoositase on vallastüüpi.

Primaarreguleerimine toimub automaatselt, tuginedes lokaalsetele mõõtmistele. Ajaskaala algab 100 ms ja ulatub mõne sekundini. Primaartasemel toimivad

- pingeregulaatoritega (*AVR*) varustatud generaatorid ja sünkroonkompensatorid
- staatilised reaktiivvõimsuse kompensatorid (*FACTS*-seadmed)
- mehaaniliselt lülitatavad kondensaatorpatareid ja reaktorid
- trafode automaatsed astmelülitid
- automaatsed võrgutopoloogia lülitused.

Kallite *FACTS*-seadmete (põhiliselt *SVC* ja *STATCOM*) rakendamine on viimastel aastatel suurenenud. Need seadmed on hädavajalikud talitluse dünaamika juhtimisel, suurendades nii nurga- kui pingestabiilsust ning võrgu ülekandevõimet.

Primaarreguleerimine reguleerib pinget statismiga

$$U = U_s - X_Q I_Q$$

kus U – generaatori pinge

U_S – AVR sättepinge

X_Q – statism

I_Q – generaatori reaktiivvool.

Generaatori pinge ja vool on siin mõõdetud kõrgepinge poolel. Väiksem statism sunnib generaatorit toimima jõulisemalt ja hoiab pinget stabiilsemana. Ühtlasi peavad teised generaatorid reageerima häiringutele vähem. Statism võib olla näiteks 10% reaktiivvõimsuse nimiväärtuse suhtes. See tähendab, et pinge langemisel 10% võrra tõuseb generaatori reaktiivvõimsus nullist nimisuuruseni. Statismi sobitamisega erinevate generaatorite (elektrijaamade) vahel võib mõnes elektrivõrgus saavutada pinge püsimise vajalikes piirides ka täiendavat (sekundaar)reguleerimist rakendamata.

Pinge sekundaarreguleerimine (SVR) on pinge kvaliteedi tõstmise kõrval vajalik töökindluse ja talitluse paindlikkuse tõstmiseks. Sekundaarreguleerimine lähtub süsteemi jaotamisest teoreetiliselt sõltumatuteks regioonideks (*voltage control area*), mille pinget võib muuta üksteisest sõltumatult. Sekundaarreguleerimine seisneb kindlate reaktiivvõimsust genereerivate seadmete automaatses juhtimises selleks, et reguleerida pinget teatud kontrollsõlmedes (*pilot node*), mis mõjutab kogu regiooni pinge taset. Reaktiivvõimsuse juhtimise toimingud, nagu generaatorite ergutuse muutmine, kondensaatorpatareide lülitused jm, avaldavad mõju vaid teatud ulatuses. See võimaldab ühendsüsteemis määrata mitmeid pingereguleerimise piirkondi. Tugevalt ühendatud piirkondade korral võivad reguleerimistoimingud osutada vastastikku ebasoodsaks. Sekundaarreguleerimine peaks toimima ka pärast üksikuid talitluse häiringuid. Automaatreguleerimise korral ei tohi sekundaarregulaatorite reageerimisaeg olla alla minuti ning tertsiaarregulaatorite olemasolul ületada mõnda minutit.

Pinge sekundaarregulaatori toimeskeem on joonisel 4.18. Kontrollsõlme pinge U_K ja sättepinge U_{SK} alusel leitakse proportsionaalintegraalse kriteeriumi järgi reaktiivvõimsuse sätteväärtus Q_S , mis edastatakse reguleerimispiirkonda kuuluvatele pinge primaarregulaatoritele.

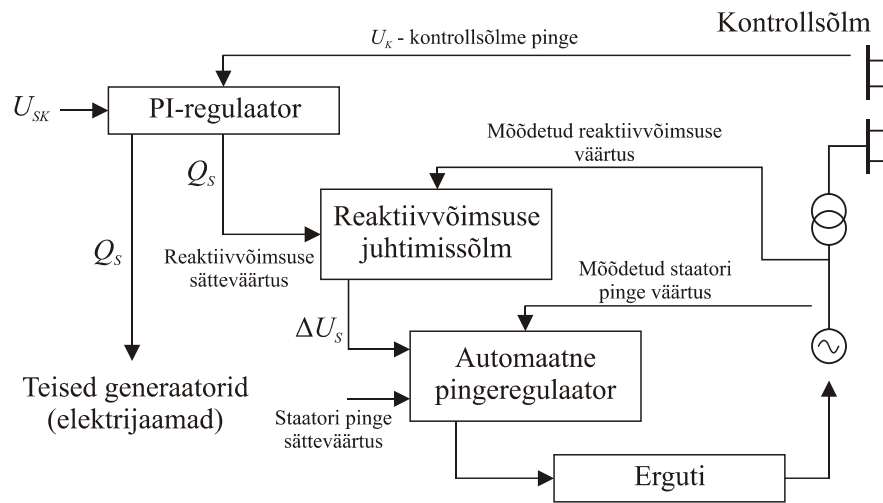
$$Q_S = \alpha \int_0^t \frac{U_{SK} - U_K}{U_N} + \beta \frac{U_{SK} - U_K}{U_N}$$

kus α ja β – tegurid,

U_N – nimipinge.

Primaarregulaatoris tuletatakse generaatori pinge sätteväärtuse U_S vajalik juurdekasv ΔU_S , mis on ergutusregulaatori sisendsuuruseks. Reaktiivvõimsuse sätteväärtused, mida arvutab

sekundaarregulaator, edastatakse piirkonna kõigile primaarregulaatoritele. Kohaliku pinge sätteväärtuse muutmisel arvestatakse generaatorite reaktiivvõimsuse piirangutega.



Joonis 4.18. Pinge sekundaarregulaatori toimeskeem.

Pinge reguleerimise kõrgemal tasemel, tertsiaarreguleerimisel (*TVR*), optimeeritakse pinget riiklikus ulatuses talitluse ökonoomsuse tõstmiseks. Muudetakse kontrollsõlmede pingsätteid. Seni toimub tertsiaarreguleerimine enamasti käsitsi operatiivpersonalilt. Tegemist on suhteliselt aeglase reguleerimisega, automaatika korral on reageerimisaeg 5...15 minutit. Reageerimisaeg ei tohi olla alla 5 minuti selleks, et anda võimalus sekundaarreguleerimisel õigesti toimida. teisalt ei tohi reageerimisaeg olla liiga pikk, et mitte lasta süsteemi talitlusel siirduda ebatöökindlasse piirkonda.

Pinge plaanimise eesmärgiks on välja uurida optimaalsed pinge reguleerimise ja reaktiivvõimsuse genereerimise võimalused. Plaanitakse erineva ennetusajaga – päev, nädal, kuu. Plaanimise tulemusteks on regulaatorite optimaalsed sätted, aga ka näiteks mitteautomaatselt muudetavad trafode ülekandetegurid. Talitluse töökindluse tagab reguleerimisvaru kõikide prognoositavate stsenaariumite jaoks. Pingegraafikud koostatakse, arvestades nii talitluse ökonoomsust kui töökindlust. Need nõuded on sageli vastuolulised. Vajalik on reaktiivvõimsuse reserv, mis toimib võimalike "normaalsete" häiringute korral. Pinge plaanimine arvestab olukorda tunduvalt pikema aja peale ette võrreldes pinge reguleerimisega, mis sisuliselt on sidusjuhtimine.

Pinge reguleerimise praktiline teostus elektrisüsteemides võib olla mitmesugune. Kasutusel on erinevad seadmed ning automatiseerimise astmed. Küllaltki sageli reguleeritakse käsitsi, kus operatiivpersonal muudab telemõõtmiste põhjal regulaatorite sättesuursi või otseselt pinge väärtusi. Elektri tootmise, ülekande ja jaotamise restruktureerimine muudab küll pinge

reguleerimise korraldust (standardid, poliitika, juhendid), kuid mõjutab vähe reguleerimise tehnilisi põhimõtteid.

4.5 Laimõotesüsteem

Elektrisüsteemi talitluse seire ja juhtimine on seni toimunud põhiliselt dispetsisüsteemi (SCADA) andmete alusel diskreetimissammuga 1...2 s ja enam. Kuna protsessid kulgevad elektrisüsteemis kiiresti, on mõõtmisi vaja teha mõnekümne millisekundilise sammuga. Tõsi, kasutusel on rikkemeerikud, mis registreerivad ja talletavad talitusparameetrite väärtusi mingi kindla häiringu korral piisava sagedusega, kuid need on lokaalse iseloomuga. Protsesside jälgimiseks ja juhtimiseks ühendalektrisüsteemis on vaja kooskõlastatud mõõtmisi vähemalt süsteemi teatud regiooni ulatuses.

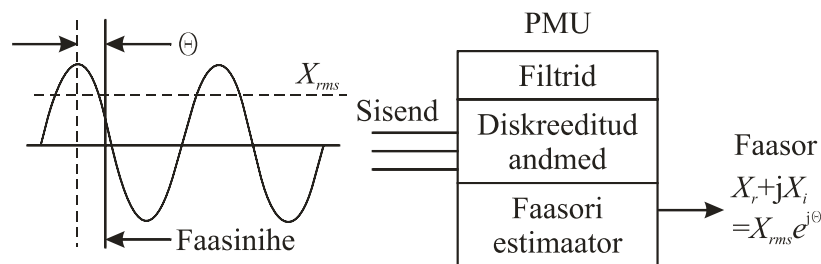
Viimasel aastakümnel on maailmas hakanud levima sünkroonitud faasimõõteseadmed (PMU), mis mõõdavad elektrivõrgu pingeid ja voole 10 kHz suurusjärgus. Faasimõõtmised varustatakse ajamärgenditega ja edastatakse tavaliste andmesidekanalite kaudu kontsentraatoritesse, mis elektrivõrgu eri paikadest saabunud andmed kooskõlastavad. Täpne mõõteaeg saadakse globaalse positsioonimissüsteemi (GPS) satelliitide ajasignaali abil. Faasimõõteseadmeid ei vaja elektrisüsteem palju, eesmärgist olenevalt vaid mõni kuni mõnikümmend.

4.5.1 Sünkroonitud faasimõõtmised

Faasimõõturi (*Time Synchronised Phasor Measurement Unit, PMU*) toimimispõhimõtet näeb joonisel 4.19. Mõõdetakse kolmefaasilise süsteemi pingeid ja voole, millest estimeeritakse ajamärgendile vastav põhiseduse faasor. PMU väljastab faasori rist- või polaarkoordinaadistikus, lisaks ka sageduse ja selle muutumise kiiruse. Lokaalseks kasutamiseks võidakse mõõta (estimeerida) harmoonikuid, vastu- ja nulljärgnevuskomponente ja muid suursi.

Faasimõõtmised tuginevad voolu ja pinge väärtuste mõõtmisele sagedusega näiteks 128 valimit põhiseduse ühe perioodi kohta (6400 Hz). Esmaste mõõteväärtuste alusel estimeeritakse voolu ja pinge faasorid ning sagedus. Tulemuste täpsus võib olla suur: pinge 0,2%, vool 0,5%, sagedus ± 5 mHz, nurk $\pm 0,1^\circ$. Faasorite leidmine on seotud mõõtmiste ajahetkega, mis määratakse kindlaks GPS-i abil mikrosekundilise täpsusega. Andmed salvestatakse lokaalselt ringpuhvrisse, mis sisaldab näiteks 24 tunni andmeid. Pikemalt võidakse andmeid mõningal määral agregeerituna säilitada 30 päeva.

Faasor on püsitalituse mõiste. Tegemist on kompleksuurusega, mis vastab puhtale, teatud sagedusega sinusoidile. Sünkroonitud faasimõõtmiste korral pakub huvi vaid nimisagedus või sellele lähedane sagedus. Tegelikult on nii pinge kui voolu väärtustes harmoonikuid, aga ka mitteharmoonilisi ja siirdekomponente. Neid komponente püütakse välja filtreerida analoog- ja digitaalfiltritega. Olukorras, kus see pole võimalik (nt siirdetalitluse ajal), märgitakse faasimõõtmised vealisteks.



Joonis 4.19. Faasimõõtuuri toimimispõhimõte.

Pakutavate faasimõõturite kvaliteet erineb. Paljude mõõturite täpsus väheneb oluliselt, kui võrgusagedus langeb alla nimisageduse. Erinevalt kasutatakse ka mõõtetetrafosid. Mõned rakendavad kaitse-, teised mõõtemähiseid. Kuna laimõõtmistel pole andmeliiasust, avalduvad vead tulemustes otseselt. Faasimõõtmiste probleemideks on

- sisendsignaali mittesiinuselisus
- diskreetsignaali spektrite kattumine
- puistenähtus ja mürad
- sageduse hälve
- ebasümmeetria
- transiendid
- alaliskomponent
- sageduse estimateerimine
- mõõtetetrafode ebalineaarsus
- täpse aja määramine
- sidekanalite suutlikkus ja vead.

Mõõdetavate suuruste hetkväärtused ei pruugi olla siinuselised, vaid on moonutatud kõrgematest harmoonikutest. Põhikomponendi saamiseks tuleb andmeid filtreerida, mida tehakse Fourier' teisendusega. Kasutusel on diskreetne Fourier' teisendus (*DFT*) või kiire Fourier' teisendus (*FFT*).

Diskreetsignaali spektrite kattumine (*aliasing*) tekib, kui diskreetimissagedus on liiga väike sisendsignaali sagedusriba laiusega võrreldes. Spektrite kattumine põhjustab tulemustes vea. Vea vältimiseks filtreeritakse liiga kõrged sagedused sisendsignaalist välja.

Faasoresitus nõuab, et signaal oleks muutumatu iseloomuga. Seda võib eeldada teatud ajavahemiku (*time span*) kohta, mida nimetatakse ka andmeaknaks (*data window*). Andmeakna osatähtsus on signaali kuju määramisel suur. Aknast tingitud Fourier' teisenduse vigu nimetatakse puistenähtuseks (*leakage effect*). Vead tekivad, kui andmeaken ei ole kooskõlas signaali põhisagedusega, näiteks kui avariiolektrisüsteemi sagedus tunduvalt muutub. Põhimõtteliselt võib andmeaken olla ka murdosa põhisagedusest. Sellised mõõtmised on vajalikud kiiretoimelise releekaitse tarvis. Mürasid, mis võivad olla tekkinud sidekanalites, iseloomustab mitteharmooniline sagedus ja juhuslikkus.

Sagedus on enamasti $\pm 0,5$ Hz nimisagedusega võrreldes. Saartalitluses ulatub sageduse hälve kuni ± 10 Hz. Kuigi faasori representatsioon ei sõltu sagedusest, on diskreetimissagedus kooskõlastatud põhisagedusega ja sageduse hälbed põhjustavad Fourier' teisenduses vigu. Üheks vigade allikaks on diskreetimissageduse ebäühtlus. Need vead tulevad esile, kui diskreetimissagedus ei ole põhisageduse kordne. Sel juhul ei saa ka tavalist Fourier' teisendust alati kasutada. Pakutakse vähemruutude meetodit, Kalmani filtrit jm. Kolmefaasiline süsteem võib olla ebasümmeetriline. Faasorit tohib estimateerida vaid pärijärgnevuskomponendi järgi.

Probleemiks on ka transiendid, mida võib jagada elektromagnetilisteks ja elektromehaanilisteks. Elektromagnetilisi transiente tekitavad lülitused ja lühised. Elektromagnetilised transiendid peegelduvad ja paljunevad elektriliinides ja transformaatorites ka resonantsi tõttu. Harmoonikute allikaks on ennekõike jõuelektroonikaseadmed. Resonantsi tekitavad piki- ja põiklülituses kondensaatorid koos mitmesuguste induktiivsustega. Kiireid transiente põhjustab äike, aga lühise korral ka elektrikaar. Elektromehaanilised transiendid on põhjustatud sellest, et generaatorite pöörlemiskiirused ei pruugi kokku langeda nimikiirusega. Seetõttu moodustub pinge elektrivõrgu mingis sõlmes erinevate sageduste superpositsioonina, tulemusena pulseeriv väärtus. Transientidele reageerivad väärtalt ka mõõtetrafod. Kuigi transientkomponente püütakse filtreerida, satuvad siirdeprotsessidest tingitud lähtesignaali muutused mitmesse järjestikusse andmeaknasse ja annavad vale ettekujutuse faasorist. Kasutuskõlblikud on vaid andmed, mis on saadud enne ja pärast häiringut. Siirdeprotsessis tekib talitluses aperioidiline komponent, mis sisulisel on alaliskomponent. Alaliskomponent võib tekkida ka pinge mõõtmisel siirdeprotsesside tõttu mahtuvuslikus pingejaguris. Enamasti

sumbub alaliskomponent piisavalt kiiresti. Alaliskomponenti, mis on seotud mainitud transientidega, pannakse tähele koos nendega.

Sagedust estimeeritakse ajavahemike mõõtmise järgi, mil signaal läbib nulli. Probleemiks on harmoonikud ja ebasümmeetria. Kasutatakse filtreerimist. Oluline on andmeakna pikkus. Pikema akna korral on vead väiksemad. Sagedust on vaja mõõta ka koormuse sagedusejärgsel vähendamisel. Vastavad releed hindavad sagedust 5...6 tsükli alusel. Sama suurt andmeakent võib kasutada sageduse estimeerimisel. Liiga suur andmeaken põhjustab vea sageduse kiire muutumise korral.

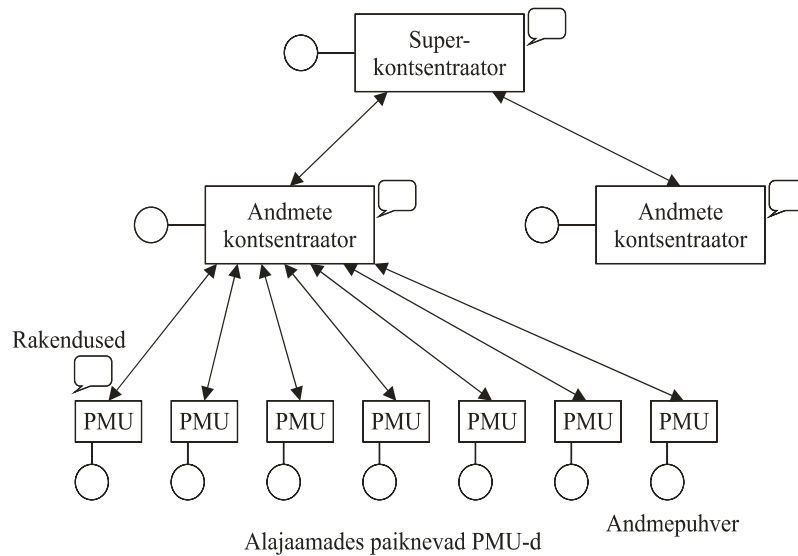
Laimõõtesüsteem sõltub GPS-i täpse aja signaalidest. Ajasignaalide vastuvõtt võib olla häiritud meteoroloogiliste tingimuste tõttu. Omaette probleem on GPS-i militaarne iseloom. Tulevikus rakendatakse laimõõtmisteks ka Euroopa Galilei süsteemi. Mingi aja toimivad laimõõtesüsteemid ilma satelliitide ajasignaalideta.

Sidesüsteem on laimõõtmiste hädavajalik tugi. Kui laiseiresüsteemi tarvis kõlbab mis tahes andmeedastussüsteem, siis laijuhtimissüsteem vajab piisavalt kiiret sidet. Sideaeg alla 200 ms on saavutatav protokolliga *TCP/IP*, kuid alla 20 ms ei jõuta ka erikanalite korral. Laijuhtimissüsteem vajab alati erikanaleid.

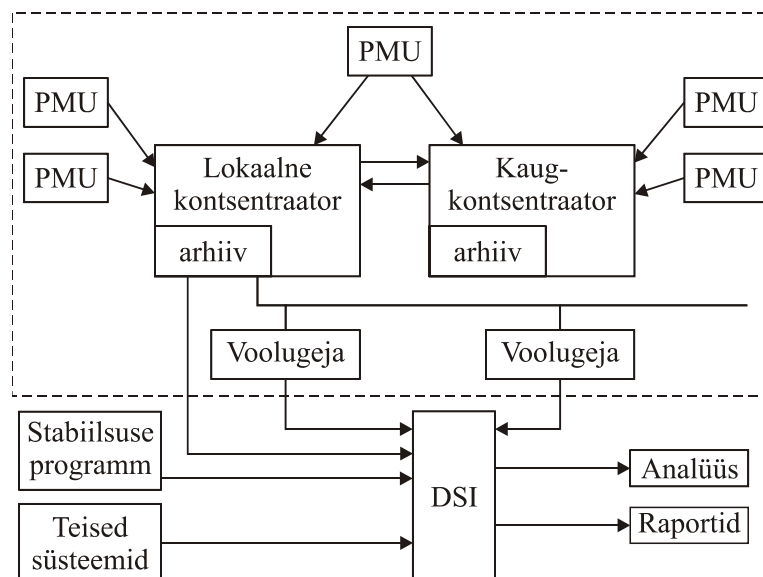
Faasimõõturid paigutatakse alajaamadesse. Paigutuskohtade valik sõltub rakendustest. Laimõõtesüsteemi põhimõtteline arhitektuur on joonisel 4.20. Kohalikud faasimõõtmised salvestatakse hilisema analüüsi tarvis. Salvestatakse ringskeemi alusel. Selleks, et mingi huvitava sündmuse andmed ei läheks kaotsi, salvestatakse andmed püsivalt samal põhimõttel kui rikkemeerikute puhul. Faasimõõteandmed koondatakse kontsentraatoritesse, kus detekteeritakse halvad andmed ja moodustatakse ajaliselt kooskõlastatud faasimõõtmised, mis on kasutatavad rakendustes. Nii või teisiti lahendatakse siin ka andmelatentsuse (*data latency*) probleem, mis on seotud andmeedastuse viitega. Ühendsüsteemides on vajalik kontsentraatorite kõrgem tase, mis ühendab erinevatest alamsüsteemidest saabuvas andmed. Joonisel on andmeedastus kahesuunaline. Põhiline andmevoog liigub pärisuunas. Tagasisuund on mõnikord vajalik faasimõõturite seadistamiseks.

Suure arvu faasimõõturite paigaldamisel nii nagu USA lääneranniku ühendsüsteemis WECC, tuleb tähelepanu pöörata laimõõtmiste kooskõlastamisele omavahel ja ka muude mõõtmistega, ning asjakohaste rakenduste loomisele. Joonisel 4.21 suunatakse faasimõõturite (*PMU*) andmed kontsentraatoritesse, mis leiavad faasinurgad ja muud rakendustes vajalikud suurused. Saadud andmeid võib ära kasutada otseselt või jätkata nende töötlemist voolugejas, kus

andmeid arhiveeritakse, tehakse spektraalanalüüsi ja detekteeritakse sündmusi. Järgneb elektorisüsteemi dünaamilise oleku identifitseerimine (*Dynamic System Identification, DSI*) ning seejärel on andmed valmis mitmesugusteks rakendusteks.



Joonis 4.20. Laimõotesüsteemi arhitektuur.



Joonis 4.21. Laimõotesüsteem.

Mõtteandmed kantakse üle kõigile süsteemioperaatoritele. Andmeedastusel on olulised kanali läbilaskevõime ja latentsus – aeg andmete moodustamisest nende kasutusvõimaluseni rakendustes. Edastatavad andmehulgad ei ole laimõõtmiste korral suured. Küll aga võivad mõned rakendused, näiteks juhtimisülesanded, nõuda väikest latentsusaega. Kasutatavad on põhimõtteliselt kõik sideliinid. Ülekaalukalt paremad on siiski fiiberoptilised kaablid, kus pole probleeme läbilaskevõimega ega häiringutega.

Faasimõõturite andmevood esitavad andmeedastussüsteemile küllalt suuri nõudeid. Seetõttu ei saa neid elektrisüsteemi palju paigutada. Paigutuskohad peavad olema hoolikalt valitud ning vastama laiseiresüsteemi võimalikele rakendustele. Üks olulisi rakendusi võiks olla talitluse estimeerimine. Võrgu talitlusest piisava ülevaate saamiseks on faasimõõtureid vaja 20...25% sõlmedes. Vähemalt esialgu on sellise hulga mõõturite paigaldamine ebareaalne. Tunduvalt vähem on vaja mõõtureid selleks, et avastada süsteemi võnkumist ja võimalikku pingekollapsit või jälgida piirkondadevahelisi võnkumisi. Kohalike võnkumiste ja dünaamilise stabiilsuse seireks tuleb mõõturid paigutada suurte elektrijaamade lähedale. Sageduse siirdeprotsesside avastamiseks aga võrgu regioonidesse, mis võivad üksteisest eralduda (sattuda saartalitlusse). Pinge jälgimiseks tuleb mõõturid paigutada suurte tarbimiskeskuste lähedastesse kontrollsõlmedesse (*pilot node*), mida muuhulgas iseloomustavad suured lühisvõimsused. Sobivateks faasimõõturite paigutukohtadeks on ka suurte ülekandeliinide lõpusõlmed ning *FACTS*- ja *HVDC*-seadmete terminalid ja sõlmed, mis on varustatud erikaitsega (*Special Protection System, SPS*).

4.5.2 Laimõõtesüsteemi rakendused

Sünkroonitud faasimõõtmisi võib rakendada elektrisüsteemi talitluse laiseiresüsteemi (*Wide Area Monitoring System, WAMS*) moodustamiseks. Jälgitakse ennekõike talitusparameetreid, mis iseloomustavad elektrisüsteemi pinge stabiilsust ja elektriliinide ülekuumenemist. Oluline on elektri ülekandekoridoride (*power corridors*) talitluse seire, kus märgatavaid võimsusi kantakse pikkade vahemaade taha. Üks esimesi laiseiresüsteeme toimibki juba kümnekond aastat elektri ülekande jälgimisel USA läänerannikul. Huvi laiseire vastu on tõusnud viimastel aastatel toimunud suurte süsteemiavariide tõttu Põhja-Ameerikas ja Euroopas. Laiseiresüsteemi võib vaadelda kui intelligentset alarmiprotsessorit ning efektiivset abilist otsuste langetamisel.

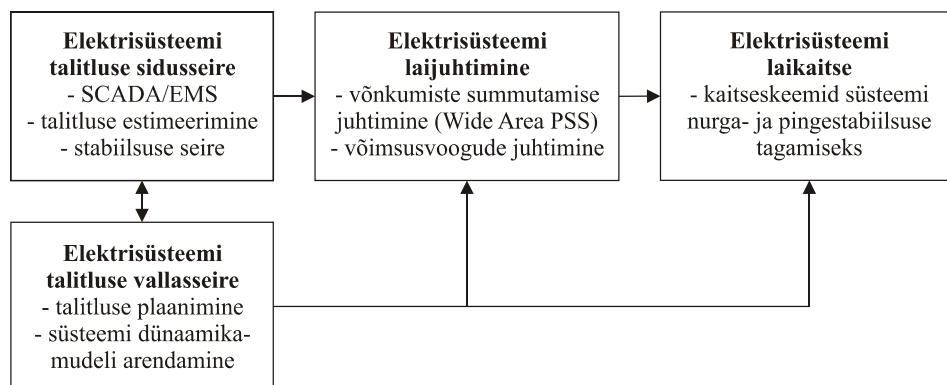
Laimõõtmiste edasiarenemisel saab võimalikuks laijuhtimissüsteemide (*Wide Area Control System, WACS*) loomine, mis toimivad automaatselt elektrisüsteemi ülekandevõime tõstmiseks ja stabiilsuse säilitamiseks. Ohtliku olukorra tekkimisel võib juhtida generaatorite ergutust elektrisüsteemi stabilisaatorite (*PSS*) abil, sättida türistorjuhitavaid kompenseerimiseadmeid (*FACTS*) ning teha vajalikke lülitusi. Teisisõnu, tegemist oleks elektrisüsteemi laikaitsega (*Wide Area Protection, WAP*). Automaatselt võib reguleerida ka elektrisüsteemi püsitalitlust, hoides ära avariihohtlike olukordi. Kuna laijuhtimissüsteemi tehnika võimaldaks ka laiseiret, siis neid süsteeme ühendades moodustub laiseire- ja juhtimissüsteem (*Wide Area*

Monitoring and Control System, WAMC). Mõõtetulemusi on võimalik kasutada vallaskujul talitluse plaanimisel ja elektrisüsteemi dünaamikamudeli arendamisel (joonis 4.22).

Laimõõtesüsteemi kasutuselevõtt püsitalitluse seirel lisab traditsiooniliste SCADA andmetega võrreldes võimaluse jälgida ka elektrisüsteemi siirdeprotsesse. Laiseiresüsteemi moodustab laimõõtesüsteem koos rakendustega. Rakenduste põhieesmärgiks on hinnata süsteemi suutlikkust, ennekõike elektri edastusvõimet reaalajas. Oluline on ennetada probleeme. Võimalikeks rakendusteks on

- faasinurkade ja nurgastabiilsuse jälgimine
- elektrikoridoride talitluse seire
- pingestabiilsuse näidustamine
- termiliste piirangute näidustamine
- sündmuste avastamine
- saartalitluse avastamine
- piirkondlike ja piirkondadevaheliste võnkumiste sumbumise seire
- talitluse estimateerimine
- häiringute vallasanalüüs
- elektrisüsteemi dünaamikamudelite adapteerimine
- talitluse dünaamika teaduslikud uuringud.

Laiseiresüsteemi toiminguid võib nimetada süsteemi suutlikkuse seireks (*dynamic performance monitoring*) eriti koostöös talitluse tugisüsteemiga (*EMS*).



Joonis 4.22. Laimõõtesüsteemi rakendusvaldkonnad.

Faasinurkade jälgimine, mis SCADA mõõtmiste alusel pole võimalik, tõstab tunduvalt talitluse lubatavuse hindamise usaldatavust. Mõõteandmete töötlemine sellekohaste algoritmiga võimaldab väljastada alarme, mis hoiatavad operatiivpersonalit avariiohtlike olukordade eest. Ennekõike jälgitakse võnkumiste sumbumust, mis tekib talitluse väikeste häiringute tõttu ja on

seega alati hinnatav. Samad sumbumuse näitajad kehtivad üldiselt ka suuremate häiringute korral.

Oluline on elektriülekandekoridoride talitluse seire, kus suuri võimsusi kantakse pika vahemaa taha. Esimesed laiseiresüsteemid moodustatigi elektrikoridoride talitluse seireks nii USA-s kui Euroopas. Juba tagasihoidlik arv faasimõõtureid (vähemalt 2) võimaldab jälgida pingete faase ülekande kummaski otsas. Jälgitakse ka liinide võimalikku ülekuumenemist.

Pinge mittestabiilsuse ohu avastamiseks ei piisa pingetaseme jälgimisest. Madal pingetase ei põhjusta tingimata ebastabiilsust. Pinge ebastabiilsus võib lähtuda ka nimipingelähedasest olukorrast, kui reaktiivvõimsust kompenseeritakse suurel määral kondensaatoritega. Pinge staatilise stabiilsuse ennustaja (*Voltage Instability Predictor, VIP*) koormussõlmes või elektrikoridoris põhineb lihtsatel aseskeemidel, mille parameetreid estimateeritakse mõõteandmete alusel. Elektrikoridori korral on lähteandmeteks ka vastavad võrguparameetrid. Laiemas ulatuses on võimalik pinge staatilist stabiilsust hinnata, tuginedes talitluse WAMS-põhiselt estimateeritud andmetele. Arvestatakse ka *FACTS*-seadmete ja muude pingeregulaatorite mõju. Ühtlasi võib leida nende seadmete optimaalsed sätted. Pinge keskajaline dünaamika tuleb päevakorda, kui trafodel on astmelülitid. Pinge keskajalist stabiilsust mõjutavad astmelülitite kõrval generaatorite ülekoormatavuse tingimused ja koormuse taastumise kiirus. Need karakteristikud võivad põhjustada aeglasi muutusi, mis lõpuks (nt 10 min pärast) viivad pinge kollapsini. Stabiilsust kontrollitakse sellekohaste diferentsiaalvõrranditega, mis tuginevad pinge (trafotegurite) muutuse esimesele ja teisele tuletisele.

Sündmused, nagu lühised, liinide lülitused, injektsioonide muutumine, lähtuvad seni suurel määral lüliti signaalidest. Sündmusi saab aga kontrollida ka faasimõõtmiste alusel, kasutades sobivat talitluse arvutamise algoritmi. Kuna faasimõõtmisi on vähe, saab sel moel jälgida sündmusi vaid süsteemi olulisemates lõikudes. WAMS võimaldab avastada ohtlikke olukordi ning määrata kindlaks nende iseloom, lähtekoht ja levimise ulatus. Edaspidi rakendatakse selliseid andmeid laikaitse (*WAP*) ja erikaitse (*SPS*) rakendustes.

Saartalitlus on oluline sündmus ühendsüsteemi töös. Saartalitluse avastamiseks sobib pinge-faaside muutumise alusel määratud sagedus. Normaaltalitluse korral on sagedus kogu ühendsüsteemis sama, saartalitluses aga mitte. Faasimõõtmised sobivad hästi sageduse kiireks määramiseks süsteemi eri osades. Saartalitlus oleks vaja avastada juba varakult. Ohuks on siiski võimalus eksida, sest tegemist võib olla võnkumisnähtusega.

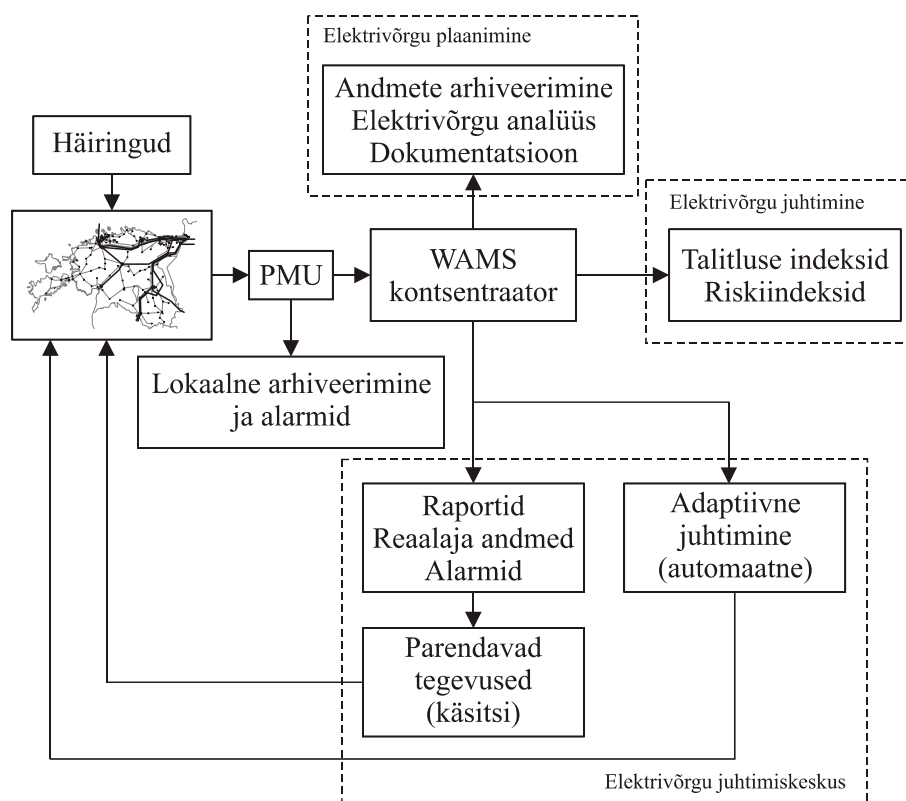
Üks laimõõtmiste olulisemaid rakendusi on modaalanalüüsil põhinev elektrisüsteemi võnkumiste avastamine ja seire. Võnkumised võivad lähtuda talitluse suurematest häiringutest nagu generaatorite või ülekandeliinide lülitused. Kuid ka väike ülekantava võimsuse juurdekasv võib viia ebastabiilse võnkumiseni. Elektri ülekanne suurtele kaugustele võib põhjustada piirkondadevahelise võnkumise. Generaatorite rootorite võnkumise sumbumine on oluline tegur elektrisüsteemi stabiilsuse säilitamisel. Sumbumist aitab tagada elektrisüsteemi stabilisaator (*PSS*). Võnkumise sumbumist väljendab elektrisüsteemi dünaamikamudel, mille parameetreid hinnatakse faasimõõtmiste alusel. Vältimaks ebastabiilsust, kui sumbumus liigselt väheneb, rakendatakse ennetavaid meetmeid. Kui sumbuvuse tase ületab etteantud piiri, väljastatakse *SCADA*-alarm. Kiiremale võnkumiste sumbumisele aitab kaasa ülekantavate võimsuste vähenemine, stabilisaatorite õiged sätted jm. Võnkumiste iseloomu alusel võib kontrollida elektrisüsteemi dünaamikamudelit. Oluline on jälgida võnkumisi süsteemi eri regioonide resünkronimisel. Siin on võnkumiste sumbuvus otsustav näitaja.

Süsteemi talitluse määramiseks on vaja teada võrgu konfiguratsiooni ning sõlme pingete väärtusi ja nurki. Kuna tavalised *SCADA*-mõõtmised nurki ei haara, siis leitakse need arvutustega. Estimateerimisel püütakse andmeliiasusele toetudes leida kõige tõenäosem talitlus. Mõõtmisi peab täpsustama ja detekteerima halbu andmeid. Tuleb leida ka topoloogiavead ning täpsustada võrgu parameetreid. Kuna faasimõõtmised tähendavad talitlusparameetrite otseseid ja väga täpseid mõõtmisi, siis võimaldavad need tunduvalt parandada talitluse estimateerimist. Faasimõõtmisi võib rakendada estimateeritud talitluse kontrollimiseks või lülitada need otseselt estimateerimisprotsessi. Probleemiks on faasimõõtmiskohtade vähene arv. Teisalt on need mõõtmised sagedasemad. Ära võib kasutada nurkade ja voolude väärtusi. Algoritme sellise hübriidestimateerimise loomiseks on mitu. Uuringud näitavad, et juba strateegiliselt olulise piirkonna 10%-line katmine faasimõõtmistega tõstab oluliselt estimateerimise täpsust ja kiirust. Faasimõõtmise otsesel kasutamisel on tegemist hübriidestimateerimissüsteemiga (*hybrid state estimator*). Omaette probleem on ühendsüsteemi talitluse estimateerimine (*multi-area state estimation*). Siin püütakse ühendada piirkondlikult estimateeritud tulemusi.

Palju võimalusi pakuvad laimõõtmiste vallasrakendused. Talitluse parema staatika- ja dünaamikamudeli koostamine võimaldab paremini talitlust plaanida ning annab täpsemad lähteandmed juhtimis- ja kaitseseadmete sättimiseks. Talitluse plaanimisel on olemas oht, et avariolukordade vältimiseks rakendatakse liigseid meetmeid. Teisalt võib juhtuda, et ei nähta ette kõiki ohtlikke olukordi. *WAMS* olemasolul võib arvestada sellega, et operaatorid on kju-

nenud olukorrast paremini informeeritud. Joonisel 4.23 on illustreeritud laiseiresüsteemi rakendusi.

Stabiilsuse laikaitse võib olla kas erikaitse (*SPS*) või korrektiivset (*Remedial Actions Schemes, RAS*) tüüpi. Erikaitse reageerib eelnevalt valitud sündmustele (lülitustele). *RAS* on vastupidi erikaitsele pideva toimega, jälgides süsteemi reageerimist häiringutele. Neid kahte toimet võib liita ühte *WACS*-süsteemi (*Wide-Area Stability and Voltage Control System*) nii, et pidevalt toimiv talitluse korrigeerimine asendub vajaduse korral suuremate lülitustega. *WAMS* ja *WAMC* toimet võib vaadelda püsitalitluse, siirdetalitluse (nt piirkondadevaheline võnkumine) ja avariitalitluse olukorras (tabel 4.5).



Joonis 4.23. Laiseiresüsteemi rakendusi.

Tabel 4.5. WAMS ja WAMC toime talitluse erinevates olukordades.

	Püsitalitlus	Siirdetalitlus	Avariitalitlus
Seire (WAMS)	Stabiilsuse jooksev hindamine	Süsteemi dünaamika, nt võnkumiste sumbumise seire	Talitluse avariijärgne seire
Juhtimine (WAMC)	Valmistumine juhtimis- ja kaitseaktsioonideks (RAS/SPS)	Võimsusvoogude reguleerimine ja regulaatorite sättimine	Juhtimis- ja kaitseaktsioonide (RAS/SPS) täitmine

Kokku võttes võimaldavad laimõõtmised paremini kasutada elektrivõrke ja ära hoida või piirata süsteemiavariisid, suurendades seega elektrivarustuse töökindlust. Kuna laimõõttekohti on elektrisüsteemis esialgu suhteliselt vähe, on vaja traditsioonilisi SCADA andmeid ja WAMS andmeid sihipäraselt kombineerida.

4.6 Laijuhtimissüsteemid

4.6.1 Üldist

Laijuhtimissüsteemid (WACS) tõstavad automaatselt elektrisüsteemi ülekandevõimet ja säilitavad elektrisüsteemi stabiilsust. Laimõõtmised sobivad näiteks kiirete juhtimiseadmete (*network controller*) nagu PSS ja FACTS-seadmete sättimiseks. Samuti võib juhtida elektrisüsteemi regulaatoreid ja teha vajalikke lülitusi. Teisisõnu, tegemist on elektrisüsteemi laikaitsega (*wide area protection, WAP*). Automaatselt võib reguleerida ka elektrisüsteemi püsitalitlust hoides ära avariiolukordade tekkimist.

Üldiselt võib elektrisüsteemi regulaatoreid vaadelda kolmel tasemel:

- primaartase – kiired regulaatorid (AVR ja SVC)
- sekundaartase – aeglasemad ja suurema ulatusega seadmed, primaartaseme regulaatorite koordineerimiseks (AGC)
- tertsiaartase – regulaatorid, mis koordineerivad sekundaarregulaatoreid ja on suure (nt riigi) tegevusulatusesega.

Siiamaani on toimunud regulaatorite koordineerimine operatiivpersonali poolt käsitsi. Laijuhtimissüsteem võimaldab juhtimist kiirendada, arvestades protsesse laiemas ulatuses. Tingimuseks on, et automaatsed toimingud oleks operaatoritele arusaadavad ja jälgitavad.

Laijuhtimissüsteemi rakendamise põhilised eesmärgid on

- võrgu ülekandevõime tõstmine
- stabiilsuse tagamine
- pinge laireguleerimine.

Elektrivõrgu ülekandevõimet on vaja tõsta elektrituru toimimise parendamiseks. Siin tekib küsimus optimeerimiskriteeriumist. Enam kui ühe ülekandevõimaluse korral on elektrituru seisukohalt eelistatum suurema kasufunktsiooniga (*benefit function*) ülekandete (flowgate).

$$B(t) = \sum_b p_b t_b$$

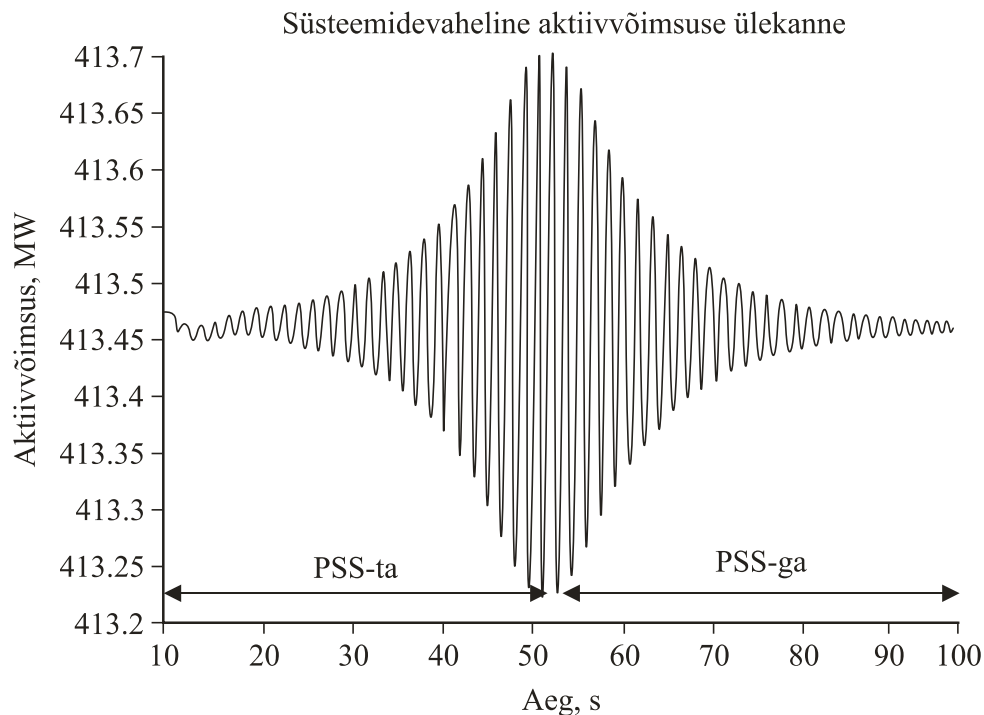
Siin p_b on hind ja t_b ülekande määr. Ülekandevõime tõstmine tähendab muuhulgas võimsusvoogude juhtimist (*coordinated power flow control*), mis muudab võimsuste loomulikku ja-gunemist. Muudatusi on vaja, et vähendada ülekoormatud liinide koormust, tõstes ülekannet mujal, mis tähendab, et süsteem ei toimi optimaalselt kadude ja muude näitajate suhtes. Samuti on vaja muudatusi, et avastada ja ennetada soovimatuid tasandusvooge (*loop flow*). Traditsiooniliselt reguleeritakse võimsusvoogusid lisapingetrafoodega (faasinihutustrafodega, *phase shifting transformer, PST*). Kaasaegsemad on FACTS-põhised dünaamilised võimsusvoogude kontrollid (*dynamic flow controller, DFC*). DFC-seadmed võimaldavad talitlushäiringute korral kiiresti (sekundi jooksul) adapteeruda olukorraga, võimaldavad vältida pinge ebastabiilsust ja reageerida ülekuumenemisele. Need juhtimistoimingud peavad aga olema eelnevalt programmeeritud.

Traditsioonilisteks stabiilsuse tagamise võteteks on kiiretoimelise releekaitse (*reduction of fault-clearing time*), kiirete ergutusregulaatorite ja stabilisaatorite (*PSS*) rakendamine. Stabiilsuse tagamise regulaatorid võib jagada kohaliku ja laijuhtimise ning pideva ja mittepideva toime järgi. Pideva toimega on pingeregulaatorid, elektrisüsteemi stabilisaatorid ning turbiniideregulaatorid aga ka türistorjuhitavad reaktiivvõimsuse allikad. Mittepideva toimega on kondensaatorpatareide ja reaktorite lülitused ning koormuse avariiline vähendamine. Pinge tõstmiseks avariiolukorras on kasutusel sünkroonkompensaatorid (*synchronous condenser, SC*). Kiirema toimega on staatilised kompensaatorid (*static var compensator, SVC*). Väga efektiivne on pikkade liinide pikikompenseerimine.

Ühendsüsteemis on elektri ülekande üheks piirajaks piirkondadevahalised võnkumised. Tavaliised stabilisaatorid (*PSS*) siin sageli ei aita ja vaja on laimõõtmisi. Laimõõtmistel põhineva süsteemi loomisel on vaja välja selgitada reguleerimisvõimalused (*control loops*), õigesti paigaldada faasimõõturid ja reguleerimisseadmed, koostada asjakohased juhtimisseadused (*control laws*) ning toime tulla laimõõtmiste võimalike viidetega. Välja töötatud on elektrisüsteemi laiatoimeline stabilisaator (*multi-band PSS, PSS4B*), mis reageerib nii generaatori rootori kiirusele kui ka pingele ja voolule. Stabilisaator on seatud reageerima kolmele võimalikule võnkumisviisile:

- kõrgsageduslik (0,8...4,0 Hz) võnkumine sama jaama või lähedaste jaamade generaatorite vahel
- kesksageduslik (0,1...1,0 Hz) piirkondlik võnkumine
- madalsageduslik (umbes 0,04 Hz) süsteemne (globaalne) võnkumine.

Joonisel 4.24 on näide PSS toimest piirkonnavaheliste võnkumiste (0,64 Hz) korral, kui PSS lülitati sisse 50 sekundi möödumisel võnkumiste algusest.

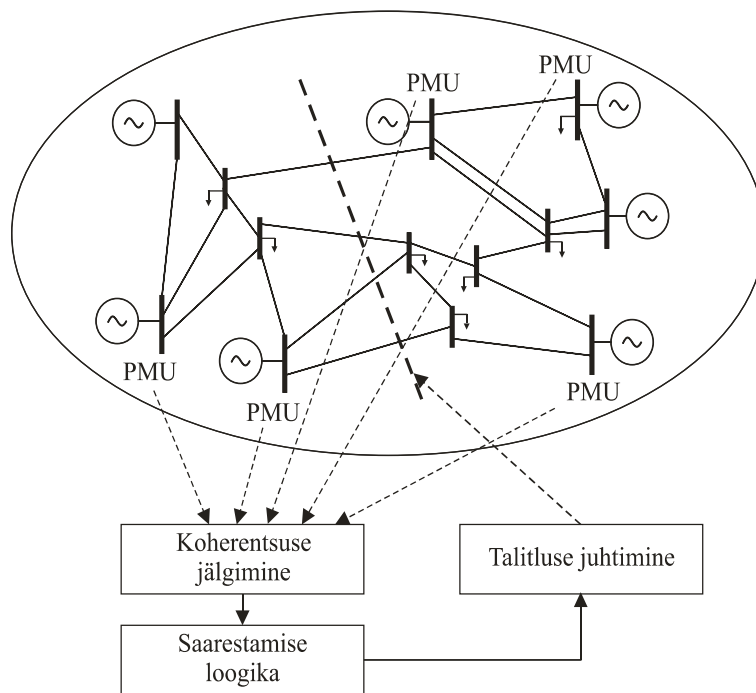


Joonis 4.24. PSS toime võimsuste piirkonnavahelise võnkumise summutamisel.

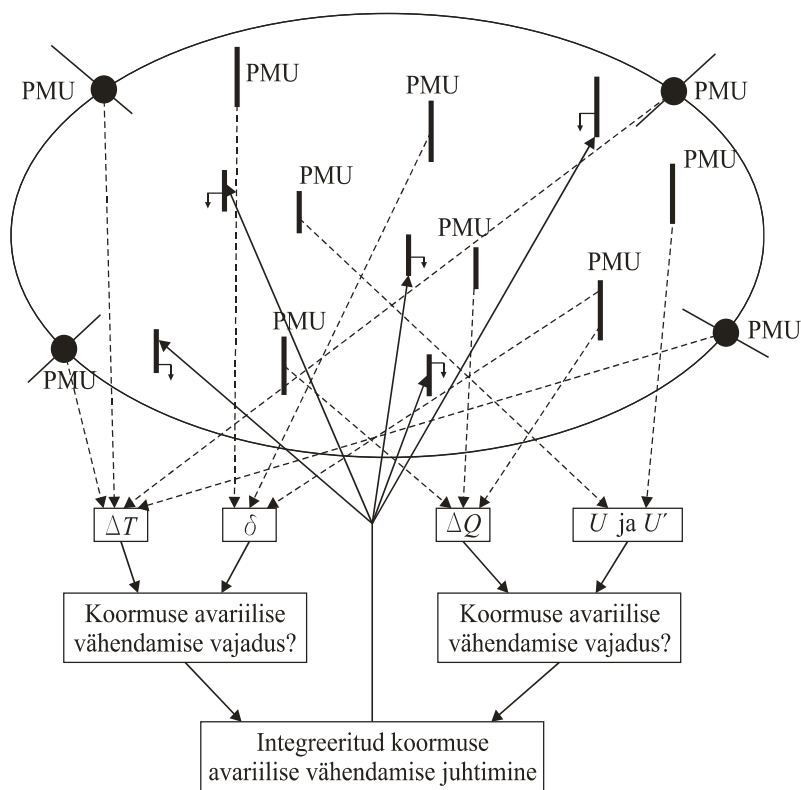
Võnkumiste summutamiseks kasutatakse ka kiiretoimelisi reaktiivvõimsuse kompensatoreid (SC ja SVC). Laimdõtmised võimaldavad koordineerida erinevaid pingereguleerimiseadmeid. Kasutusel on nii lokaalmõõtmised (kaugmõõtmised) liiniotste vahel, kui laimdõtmised. Võib näha, et laimdõtmiste kasutamine tõstab ülekande läbilaskevõimet tunduvalt.

Stabiilsuse laikaitse võib olla kas erikaitse (*special protection system, SPS*) või korrektiivset (*remedial actions schemes, RAS*) tüüpi. Erikaitse reageerib eelnevalt valitud sündmustele (lülitustele). RAS on vastandina SPSile pideva toimega, jälgides süsteemi reageerimist häirivatele. Neid kahte toimet võib liita ühte WACS-süsteemi (*wide-area stability and voltage control system*) nii, et pidevalt toimiv talitluse korrigeerimine asendub vajaduse korral suuremate lülitustega. Allpool on illustreeritud laikaitsesüsteeme, mis realiseerivad elektrisüsteemi saartalitluse vältimaks avariilise laienemise (joonis 4.25) ning avariilist koormusvähendamist (joonis 4.26).

Ülikõrgpingele mõeldud pingelaikaitsesüsteem (*wide-area voltage protection, WAP*) toimib pingestabiilsuse ja süsteemi töökindluse tõstmiseks koostöös pingelaireguleerimisega (*wide area voltage regulation, WAR*). Mõlemad süsteemid peavad toimima koordineeritult, mis ei pruugi olla lihtne ülesanne.



Joonis 4.25. WACS elektrisüsteemi viimiseks saartalilusse.



Joonis 4.26. WACS elektrisüsteemi koormuse avariiliseks vähendamiseks.

Laikaitse ja ülekandevõrgu pingereguleerimise ühendamisel räägitakse pinge tavalise ehk primaarreguleerimise kõrval veel pinge sekundaar- ja tertsiarreguleerimisest (*secondary and tertiary voltage regulation, SVR and TVR*). Primaarreguleerimise aluseks on generaatorid. Sekundaarregulaatorid reguleerivad pinget juhtimispiirkondade (*control area*) kontrollisõlmedes (*pilot node*). Tertsiarreguleerimine tähendab sekundaarregulaatorite sätete muutmist üle kogu süsteemi. Nii SVR kui TVR rakenduvad ohuolukordades. Reguleeritakse ja lülitatakse kondensaatorpatareisid, reaktoreid, sünkroon- ja staatilisi kompensatoreid aga ka trafode astmelüliteid. Vajaduse korral astmelülitid blokeeritakse. Põhieesmärgiks on vältida pinge mittestabiilsust. Pinge mittestabiilsuse indikaatoriks (*proximity indicator*) on

$$VSI_j(t) = q_i(t) + \rho \frac{\partial q_i(t)}{\partial t} \Delta t$$

kus $-1 \leq q_j \leq 1$ on j -nda piirkonna reaktiivvõimsuse tase reguleerimisseadme võimsuse suhtes, ρ – kaalutegur ning Δt – diskreetimissamm. Indikaator VSI ei iseloomusta õigupoolest pingestabiilsust, vaid SVR kaugust tema toimepiiridest. Tertsiarreguleerimine algab, kui sekundaarreguleerimisest (SVR) ei piisa. Omakorda pinge laikaitse süsteem (WAP) hakkab toimima, kui ka TVR ei tule toime. Mõlemal juhul on aluseks pinge mittestabiilsuse indeks (*real-time voltage instability index*). Laikaitse süsteemi võimalusteks on sisse lülitada reaktiivvõimsuse reserve, kui neid on, ning vähendada j -nda piirkonna koormust, alustades reaktiivkoormusest. Koormuse vähendamine toimub seni, kuni VSI-indeks ning SVR ja TVR väärtused sisenevad oma normaalsesse piirkonda.

Laijuhtimissüsteem võib olla suunatud kas süsteemi ülekandevõime või töökindluse tõstmisele. Kuna laiseire ja -juhtimine võimaldab töötada stabiilsuse piiridele lähemal, tekib oht, et süsteemi töökindlus väheneb.

Automaatsüsteemid peavad toimima korrektselt ka muutuste korral elektrisüsteemis. Vältida tuleb olukordi, kus laikaitse ise põhjustab avariisid. Võimalike avariilukordade mitmekesisuse tõttu on automaatse laikaitse seadmine keerukas.

Laikaitse- ja laijuhtimissüsteemide kasutuselevõtul on väga oluline tähtsus infoedastus kanalitel. Eriti kriitilise tähtsusega on see juhtimiskäskluste edastamisel. Tavapärase laimõttesüsteemide kasutamiseks võib põhimõtteliselt kasutada mistahes infokanaleid ja kui paigutada alajaamadesse täiendavad PDC-d (*Phasor Data Concentrator*), siis ei ole karta ka andmete kadumist, kui infoedastuses peaks toimuma katkestus. Laikaitse ja -juhtimise raames tuleb seevastu kasutada kiireid (*high-speed*) ühendusi. Siinkohal ei ole kriitilise tähtsusega mitte maht, mida üle kantakse vaid ajaline viide, mis tekib signaali edastamisel. Samuti on juhti-

mistoimingute teostamiseks vaja tagada reserv infoedastuskanalite olemasolu. Lisaks on olulise tähtsusega *GPS* signaali kasutamise robustsus, st oluline on, et terve juhtimissüsteem oleks võimeline mõnda aega töötama ilma *GPS* signaalita (on võimalus olukordade tekkeks, millal *GPS* signaal ei ole kättesaadav). Erinevate rakenduste nõuded kommunikatsiooni kiirusele on esitatud tabelis 4.6.

Tabel 4.6. Erinevate rakenduste nõuded infolekkumise kiirusele.

Rakendus	Algoritmile sobilik andmete kogumise akna suurus või juhtimiseks vajaliku perioodi pikkus	Ühesuunaline andmete liikumise kiiruse kestus <i>PMU</i> -st <i>PDC</i> -ni või vastupidi
Pingestabiilsus	20 ms - 300 s	mittekriitiline
Termiline seire	20 ms	mittekriitiline
Võnkumised / sumbumise jälgimine	20 ms / < 5 s	mittekriitiline
Tagasisidega <i>Wide-Area PSS</i>	50 ms	< 20 ms
Kontrolleri parameetrite automaatse uuendamisega <i>Wide-Area PSS</i>	> 10 s	> 1 s
Võimsusvoogude koordineerimine	0,5 s - 1 s	< 200 ms
Dünaamiline stabiilsus	< 100 ms	< 40 ms
<i>RAS / SPS</i>	0,5 s - 1 s	< 200 ms

4.6.2 Laikaitse ja -juhtimise rakendused maailmas

Faasimõõteseadmete ja laimõõtmiste kasutamise eesmärgiks on üldjuhul elektrisüsteemi talitluse hindamine. Esimesed laimõõtesüsteemid võeti kasutusele just elektrisüsteemi parameetrite mõõtmisteks. Alles suhteliselt hiljuti hakati tähelepanu pöörama laimõõtmiste kasutamise võimalustele elektrisüsteemi juhtimisel. Viimastel aastatel on areng selles valdkonnas olnud väga kiire, pidevalt tuleb juurde uusi ideid, kuidas süsteemi rakendada saab. Tulevikus on näha laimõõtesüsteemide arengut laikaitse- ja laijuhtimisesüsteemideks, hetkel rakendatakse edukalt laimõõtesüsteemi juhtimise eesmärgil suhteliselt vähestes elektrisüsteemides. Laimõõtesüsteemi vahendusel saadavate andmete alusel on võimalik teostada mõne elektrisüsteemi elemendi automaatset juhtimist, mille abil saab teostada näiteks elektrisüsteemis madalsageduslike võnkumiste sumbumist, juhtida võimsusvoogusid jne.

Käesolevas peatükis käsitletakse kompaktselt maailma erinevates elektrisüsteemides kasutatavad laikaitse ja -juhtimissüsteemid. Tuleb siiski tõdeda, et realselt kasutatavaid süsteeme on üksikuid ja needki suhteliselt algeliselt. Siinkohal tuleb rõhutada, et selline olukord tuleneb peamiselt töökindluse nõuetest ja soovist tagada elektrisüsteemi kõrge talitluskindlus. Laijuht-

timise rakenduste kasutuselevõtt on aeganõudev protsess, millede korral tuleb kõik lahendused põhjalikult läbi töötada ja katsetada ning alles seejärel saab neid kasutada elektrisüsteemi reaalses juhtimises. Erinevate maailma riikide laiseire rakendusi vaadeldi uurimistöö esimese etapi aruandes [7]. Siinkohal toome välja mõningad rakendused mida maailma erinevates elektrisüsteemides tänapäeval kasutatakse. Järgnevalt vaadeldakse madalsageduslike võnkumiste sumbumise jälgimise ja juhtimise lahendusi ning sageduse sekundaarreguleerimise lahendust.

Elektrienergia pidev tarbimise kasv, ökonoomilised ja keskkonnakaitse piirangud ja hajatootmise pidev suurenemine põhjustab elektrisüsteemide koormamist süsteemi võimalike piirideni. Selle tulemusena muutuvad järjest olulisemaks süsteemi stabiilsusega seotud küsimused. Üheks vaadeldavaks nähtuseks on madalsageduslikud võnkumised. Elektrisüsteem suudab säilitada oma stabiilsuse kui võnkumised on sumbuva iseloomuga. Niisiis on elektrisüsteemi stabiilse talitluse säilitamise üheks tähtsaks osaks võnkumiste sumbumise jälgimine ja juhtimine. Esimeseks etapiks stabiilsuse jälgimisel elektrivõrkude vahelistel ühendustel on võnkumiste avastamine ja nende analüüsimine (võnkumiste sagedus, sumbumise koefitsient, generaatorite osalus võnkumiste tekitamises jms). Kasutusel on kaks põhilist lähenemist võnkumiste iseloomu leidmiseks. Nendeks on dünaamiline komponentidel põhinevate meetodite ja mõõtmistel põhinevate meetodite kasutamine. Nende meetodite kohta saab lähemalt lugeda kirjandusest [9]. Laimõotesüsteemi abil saab kasutada mõõtmistel põhinevaid meetodeid madalsageduslike võnkumiste jälgimiseks.

Guatemala, Suurbritannia, Horvaatia, Soome ja Hiina elektrisüsteemides on juba laialdaselt kasutusel laimõotesüsteemi rakendamine madalsageduslike võnkumiste tekkimise jälgimiseks [10]-[17]. Lisaks soovivad võnkumiste sumbumise jälgimise ja juhtimise pärast laimõotesüsteeme arendada ka teised elektrisüsteemid. Üheks selliseks näiteks on Uus-Meremaa, mille kohta saab lähemalt lugeda kirjandusest [18].

Guatemalas kasutatakse laimõotesüsteemi ühe rakendusena elektrisüsteemis esinevate võnkumiste modaalanalüüsi tegemiseks. Guatemala elektrisüsteemis kasutatakse faasimõõte seadmete poolt saadud andmeid, et analüüsida madalsageduslike võnkumiste amplituudi ja sumbumise koefitsienti. Madalad sumbumise koefitsiendid on head indikaatorid võimalike ebastabiilsete võnkumiste avastamiseks. Seetõttu, dispetšerite varajane teavitamine või vastav juhtimissüsteem, mis teeb ise vajalikud lülitused, on hea meetod ebastabiilsete võnkumiste piiramiseks. Guatemalas kasutatakse laimõotesüsteemi ka laijuhtimissüsteemina, mis põhineb ajas sünkroniseeritud aktiivvõimsuste mõõtmistel ja Guatemala ning El Salvadori vahelise

võimsusvoo modaalsel analüüsil. Faasimõõde ja -juhtimise seadmed *PMCU*-d (*Phasor Measurement and Control Units*) on paigaldatud strateegilistesse sõlmedesse Guatemala elektrisüsteemis, mis hõlmavad ka ühendusi Mehhikoga ja El Salvadoriga. Süsteem avastab elektrisüsteemi toimimisele ebastabiilsed olukorrad ja seejärel sulgeb ühenduse El Salvadoriga, isoleerides Guatemala elektrisüsteemi ülejäänud Kesk-Ameerika elektrisüsteemist. Täpsemalt saab Kesk-Ameerika laiseire rakendustest lugeda [9], [15], [19], [20].

Sageduse sekundaarreguleerimise rakendust kasutatakse Kanadas Hydro-Quebeci elektrisüsteemis. Laiseiresüsteemi kasutatakse sageduse sekundaarreguleerimise varusignaali edastamiseks. Sageduse sekundaarreguleerimise varusignaali rakendus toimib järgmiselt: juhtimissüsteem arvutab vastavalt sõlmede sagedusele ja nurga muutustele tekkinud aja vea süsteemi pinge lainekuju ja universaalse koordineeritud aja vahel. Selle tulemusel saadud informatsioon vea kohta saadetakse *LFC*-sse (*Load Frequency Control*), mis kasutab seda signaali varusignaalina [21].

Tabel 4.7. Laimõõtmistel põhinevate rakenduste võrdlus.

Rakendus	Riik															
	Mehhiko	Guatemala	USA (WSP)	Kanada (Hydro Quebec)	Hiina	Soome	Norra	Sloveenia	Venemaa	Hongaaria	Korea	Itaalia	Brazília	Jaapan	Saksamaa	India
Faasinurga jälgimine / nurga stabiilsus	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+
Pinge stabiilsus			+		P				P		+	T				
Liini termiline jälgimine			P					P				P				
Võimsusvoogude jälgimine	+	+	+	+	P	+	+		P	+		+	+		+	+
Saarestumise avastamine	+	+	P		P				P			+				
Võnkumiste avastamine / jälgimine	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+		
Kaitse ja juhtimine	P, T	P	P	P, T	+	P	P	P	P	P	P, T		P			
Seisundi estimeerimine	P		P	P	P	P			P			P				
Off-line häirete analüüs	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+
Kommertstegevus	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+				
Ülikooli/teadus projekt, uuringud													+	+	+	+

Kompaktse ülevaate maailma erinevates elektrisüsteemides kasutatavatest laimõõtmistel põhinevatest lahendustest on esitatud tabelites 4.7. Tabelis tähistab + juba töösolevat rakendust, *P* tähistab plaanitavat rakendust ja *T* katsetamisjärgus olevat lahendust.

4.6.3 Võimalikud rakendused Eesti elektrisüsteemis

Eesti elektrisüsteem juhtimiseks on kasutusel peamiselt SCADA süsteem, mille vahendusel teostatakse elektrisüsteemi erinevate alajaamade jälgimist ja juhtimist. Võimalik on teostada

lülitustegevusi ning jälgida peamiste seisundiparameetrite muutumisi. Täiendavalt on kasutusel ka laimõõtesüsteem, mille peamiseks eesmärgiks on Eesti elektrisüsteemi 330 kV osa jälgimine. Laimõõtesüsteemi vahendusel ei ole võimalik teostada lülitamisi, kuid võimalik on koostada erinevaid lahendusi, mis aitavad hinnata olemasoleva süsteemi talitlust ning võimalikke muutusi selles. Eripäraks võrreldes SCADA süsteemiga on võime jälgida elektrisüsteemi talitlust reaalajas, kuna mõõteandmeid edastatakse keskkontsentraatorisse iga 0,2 sekundi järel. See on vastupidine SCADA lahendusele, kus mõõteandmeid edastatakse juhtimiskeskusesse iga muutuse järgselt.

Vaadeldes laimõõtmistel põhinevaid lahendusi, mida käsitleti uurimistöo esimese etapi aruandes ja käesolevas aruandes ning arvestades Eesti elektrisüsteemi eripärasid ja võimalikke tulevikusuundasid, siis arvestatavate laimõõtmistel põhinevate rakendustena Eesti ja Balti elektrisüsteemide kontekstis võib käsitleda ülekandeliinide läbilaskevõimet ja seeläbi liini temperatuuri seiret, madalsageduslike võnkumiste lahenduste seiret, pingestabiilsuse seiret, talitluse estimeerimist, saartalitluse avastamist ja võimalikke avariitõrjeautomaatikaga seotud lahendusi. Viimase puhul on oluline on Eesti ja Soome elektrisüsteemide vahelistel ühendustel Estlink 1 ja EstLink 2.

Eesti elektrisüsteemi juhtimise ja kaitsmise meetodite analüüsimisel ja võimalikel arengusuundadel tulevikus tuleb arvestada plaanitavat Balti elektrisüsteemi sünkroniseerimist Lääne-Euroopa elektrisüsteemiga. Selle tulemusena muutub olemasolev pilt tunduvalt ning üle tuleb kriitiliselt vaadata kõik olemasoleva elektrivõrgu juhtimisega seotud aspektid. Siinkohal on olulisema tähtsusega süsteemiautomaatika rakendused ja nende võimalikud arendused laiseiresüsteemi raamistikus. Eesti elektrisüsteemi avariitõrjeautomaatika baseerub tänapäeval pinge järgi koormuse vähendamise automaatidel, koormuse vähendamise automaatidel voolust lähtuvalt, sagedusautomaatidel, asünkroonkäiguautomaatidel, jm. Täpsema ülevaate Eesti elektrisüsteemi süsteemiautomaatikast annab lisa 2.

Arvestades viimase aja muutusi Eesti elektrisüsteemis, peamiselt EstLink 2 ja avariireservelektrijaama ja tuulelektrijaamade lisandumist süsteemi, tuleb lähitulevikus vaadelda võimalikke lahendusi lähtuvalt just erinevate tootmisüksuste ja alalisvooluühenduste vastastikusest mõjudest ja üldistest süsteemi mõjutavatest tingimustest. Arvestades, et suurim võimalik tootmisüksus Eesti elektrisüsteemis on EstLink 2 võimsusega 650 MW, siis tagamaks kiire ja korrektse reageeringu häiringute ajal on tarvis rakendada automaatseid juhtimismeetodeid. Näitena võime siinkohal vaadelda juhtumit, kus toimub EstLink 2 väljalülitumine ning sellele järgnevat täiendavat häiringut või võimsusvoogude jaotumist selliselt, et esinevad ülekoormu-

sed mõnes võrgu punktis. Sellisel juhtumil oleks mõistlik hinnata võimalikke koormuse ümberlülitamiste võimalusi arvestades siinkohal nii Estlink 1 võimalusi kui ka muid lahendusi. Samuti tuleb kriitiliselt hinnata alalisvooluühenduste omavahelise juhtimise võimalusi koormuste kiiremaks muutmiseks või ühe osana üldise süsteemi häiringukindluse tõstmisel.

Eesti elektrisüsteemi laimõõtmiste kasutamine elektrisüsteemi juhtimiseks ja kaitsmiseks on võimalik, kuid siinkohal tuleb arvestada, et olemasolev süsteem on hetkel ehitatud ainult mõõtmisi ja süsteemi vallasanalüüsi silmas pidades. Võimaldamaks laimõõtesüsteemi laiahaardelisemat kasutamist on tarvis süsteemi töökindlust tõsta läbi dubleerivate ühenduste loomise. Olemasoleva laimõõtesüsteemi võimalikeks rakendusteks võib esmajoones pidada ülekandeliinide koormuse ja elektrisüsteemi kadude määratlemisega seotud rakendusi. Mõlemad teemad on käsitlemist leidnud uurimistöö esimeses ja selles aruandes. Järgmiste rakendustena tasub kaaluda elektrisüsteemide vaheliste läbilaskevõimete analüüsi ja dünaamiliste stabiilsuse piiride hindamise rakendusi reaalajas. Selliste rakenduste kasutuselevõtt võimaldaks täpsemini hinnata elektrisüsteemi olemasolevat reaalset talitlust ning seeläbi suurendada riikidevaheliste ühenduste läbilaskevõimet ja seeläbi võimaldada elektrituru efektiivsemat talitlemist ning vähendada pudelikaelasid.

Järgmiste etappidena võib vaadelda võimalikke automaatikalahendusi, kus laiseiresüsteemi keskkontsentraator hindab saadud mõõtmiste alusel erinevaid tingimusi ning vajadusel annab signaali/juhtimiskäsu erinevate lülitite või nt alalisvooluühenduste võimsusetasemete muutmiseks. Selliste rakenduste kasutuselevõtt eeldab siiski täpsemaid arvutusi ning olemasoleva süsteemi töökindluse tõstmist. Rakenduste plaanimisel ja kontseptsiooni loomisel tuleb arvestada nii olemasolevate lahenduste kui ka võimalik arengusuundadega tulevikus lähtudes nii seadmete töökindluse kui ka elektrisüsteemi üldiste arengutega.

4.7 Kokkuvõte

Elektrisüsteemi juhtimine on keerukas protsess ning seda mõjutavad paljud tegurid. Oluline on omada adekvaatset teavet võrgus toimuva kohta ning seeläbi hinnata erinevate lahenduste mõju elektrisüsteemi talitlusele. Järjest enam muutub oluliseks täpsete ning kiiret juhtimist võimaldavate juhtimissüsteemide olemasolu ja võrgu juhtimiseks kasutatavate rakenduste sobilikkus. Tänapäeva elektrisüsteemides on viimase kümne aasta jooksul järjest enam tähtsust omandanud laimõõtmistel põhinevad lahendused. Enamjaolt on küll tegemist lihtsate laimõõtmiste lahendustega, kui järjest enam on kasutusel ka süsteemi juhtimise ja kaitsmise rakendusi.

Käesolevas peatükis vaadeldi ülekandevõrgu seire ja juhtimisega seotud küsimusi. Käsitlemist leidsin elektrivõrgu operatiivjuhtimisega ja selle toega seotud küsimused. Vaadeldi püsitalitluse analüüsi ja estimateerimise, koormuse seire, häiringuanalüüsi ja energia tootmise ohjamisega seotud teemasid. Samuti käsitleti elektrisüsteemi stabiilsusega ning sageduse ja pingereguleerimisega seotud küsimusi. Peatüki teiseks tähtsamaks valdkonnaks oli laimõõtmistel põhinevate lahenduste analüüs ning ülevaade. Käsitleti laimõõtesüsteemide rakendusi maailmas ja võimalikke arendussuundasid Eesti elektrisüsteemi omadusi arvestades.

Eesti elektrisüsteemi juhtimisel on tänapäeval kasutusel laimõõtesüsteem, mida praegu kasutatakse elektrisüsteemi elementide mudelite verifitseerimiseks ja talitluse analüüsiks. Tulevikus on olulisel kohal mitmete rakenduste kasutuselevõtt ning seeläbi suurendada süsteemi stabiilsust ning varustuskindlust. Esmasteks olulisemateks lahendusteks on ülekandeliinide läbilaskevõime ja süsteemi kadude määratlemine ning hindamine. Hilisemates etappides on vaatluse all juba konkreetsemalt süsteemi reaalajas juhtimisega seotud aspektid alates ülekandekoridoride dünaamiliste piiride määratlemisega lõpetades erinevate süsteemiautomaatika rakendustega. Viimaste teostamisel on tarvis teostada põhjalikke analüüse ning arvestada võimalike Eesti elektrisüsteemi arengusuundadega.

4.8 Kirjandus

- [1] A. G. Phadke, J. S. Thorp. Synchronised Phasor Measurements and Their Applications. Springer, 2008. 248 pp.
- [2] Wide Area Monitoring and Control for Transmission Capability Enhancement. CIGRE Working Group of Study Committee C4. Final Report. January, 2007, CIGRE TB No 330, 116 pp.
- [3] M. Meldorf, T. Tikk, J. Kilter. Elektrivõrgu operatiivjuhtimissüsteem, TTÜ kirjastus, Tallinn, 2010, 352 lk.
- [4] M. Meldorf, J. Kilter. Elektrisüsteemi stabiilsus, TTÜ kirjastus, Tallinn, 2011, 346 lk.
- [5] S. Savulescu. Real-Time Stability in Power Systems. Springer, 2006, 319 pp.
- [6] S. Savulescu. Real-Time Stability Assessment in Modern Power System Control Centers. Wiley-IEEE Press, 2009, 425 pp.
- [7] „Eesti elektrisüsteemi laiseiresüsteemi arendamine ja analüüs“, I etapi aruanne, TTÜ elektroenergeetika instituut, 2013, 194 lk.

- [8] M. Löper. Laimõõtesüsteemi rakendamine Eesti ülekandevõrgus. Bakalaureusetöö, TTÜ elektroenergeetika instituut, 2014, 61 lk.
- [9] J. G. Calderon-Quizar, „Placement of PMUs for Tracking Inter-Area Modes in the Mexican System,“ *Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition*, Montevideo, 2012.
- [10] T. Rauhala, K. Saarinen, M. Latvala, M. Laasonen and M. Uusitalo, „Applications of Phasor Measurement Units and Wide-Area Measurement System in Finland,“ *PowerTech*, Trondheim, 2011.
- [11] P. M. Ashton, G. A. Taylor, M. R. Irving, A. M. Carter and M. E. Bradley, „Prospective Wide Area Monitoring of the Great Britain Transmission System using Phasor Measurement Units,“ IEEE, 2012.
- [12] P. M. Ashton, G. A. Taylor and A. M. Carter, „Future Wide Area Monitoring Requirements for the GB Transmission System,“ *10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission*, Birmingham, 2012.
- [13] Z. Cerina, I. Sturlic and R. Matica, „Synchrophasor Applications in the Croatian Power System,“ Schweitxer Engineering Laboratories Inc, 2009.
- [14] E. M. Martinez, „SIMEFAS: Wide Area Measurement, Protection and Control System in Mexico,“ *Advances in Measurement Systems, InTech*, pp. 511-535, 2010.
- [15] E. M. Martinez, „Wide Area Measurement & Control System in Mexico,“ *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, Third Int. Conf.*, Nanjing, 2008.
- [16] B. Chen ja Y. Xie, „Wide Area Measurement System on Power Grid in Guanxi,“ *2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce*, Deng Leng, 2011.
- [17] Q. Yang and T. Bi, „WAMS Implementation in China and the Challenges for Bulk Power System Protection,“ *Power Engineering Society General Meeting*, Tampa, 2007.
- [18] J. C.-H. Peng, „Phasor Measurement Network and its Application on the New Zealand Grid: Overview and Experiences,“ *Power and Energy Society General Meeting*, 2011.
- [19] E. Martinez, L. Vanfretti and F. R. S. Sevilla, „Automatic Triggering of the Interconnection between Mexico and Central America using Discrete Control

Schemes," *4th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe*, Copenhagen, 2013.

- [20] J. V. Espinoza, A. Guzman, F. Calero, M. V. Mynam and E. Palma, „Wide-Area Protection and Control Scheme Maintains Central America's Power System Stability," Schweitzer Engineering Laboratories Inc, 2012.
- [21] I. Kamwa, J. Beland, G. Trudel and R. Grondin, „Wide-area monitoring and control at Hydro-Quebec: past, present and future," *Power Engineering Society General Meeting*, Montreal, 2006.

5 Elektrisüsteemi elementide dünaamilised mudelid ja nende verifitseerimine

Elektrisüsteemi talitluse modelleerimisel ja analüüsil on oluline omada erinevate elektrisüsteemi elementide korrektseid ja usaldusväärseid mudeleid. Eriti oluline on siinkohal komponentide korrektsed dünaamilised mudelid, millede kasutamine süsteemi dünaamikaarvutustes on vältimatu. Üldjuhul koostatakse elektrisüsteemi elementide dünaamilised mudelid olemasolevate materjalide alusel. Oluline rõhutada, et koostatud mudeleid tuleb ka verifitseerida reaalse võrgukatsetuste ja vastavate mõõtmiste alusel saadud mõõtetulemuste abil.

Käesolev peatükk käsitleb elektrisüsteemi erinevate komponentide modelleerimist ja mudelite verifitseerimist. Antakse ülevaade elektrisüsteemi olulisemate komponentide dünaamika arvutustes kasutatavatest mudelitest, nende modelleerimise põhimõtetest ning laimõõtmiste rakendamisest mudelite verifitseerimisel.

5.1 Sünkroonmasinad

Sünkroonmasinad, eriti generaatorid, on elektrisüsteemi töös otsustava tähtsusega. Valdav osa elektrienergiast toodetakse sünkroongeneraatoriga. Ka kõik elektrisüsteemi stabiilsuse probleemid on suurel määral nendega seotud. Siinkohal käsitletakse sünkroonmasina näitajaid ja nendevahelisi seoseid üldistest seisukohtadest lähtudes. Saadud tulemusi võib seejärel sõltuvalt vajadustest teisendada ja lihtsustada.

Vaatleme esmalt liikumatute magnetahelate korral kehtivaid seoseid. Elektri ahelas (joonis 5.1) aktiivtakistusega r on N keeruga pool. Vahelduvpingele u vastav vool i tekitab aheldusvoo ψ , mis indutseerib poolis elektromotoorjõu e ning moodustub pinge u

$$e = \frac{d\psi}{dt} \quad \text{ning} \quad u = \frac{d\psi}{dt} + ri \quad (5.1)$$

Aheldusvoo suurus sõltub pooli induktiivsusest L

$$\psi = Li$$

$$(5.2)$$

$$L = N \frac{\phi}{i} = N^2 P, \quad \psi = N\phi \quad (5.3)$$

kus

P – magnetiline juhtivus ehk permanents (*permeance of magnetic path*)

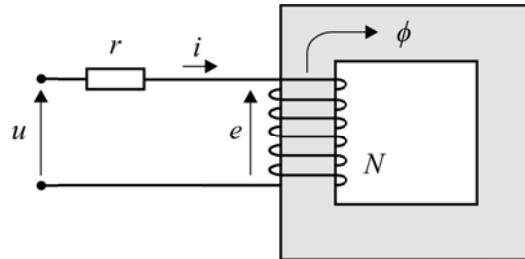
ϕ – magnetvoog (*magnetic flux*)

$$\phi = FP = NiP \quad (5.4)$$

Siin F – magnetomotoorjõud (*magnetomotive force*)

$$F = Ni = R\phi \quad (5.5)$$

kus R – magnetiline takistus ehk reluktants (magnetilise juhtivuse pöördväärtus).



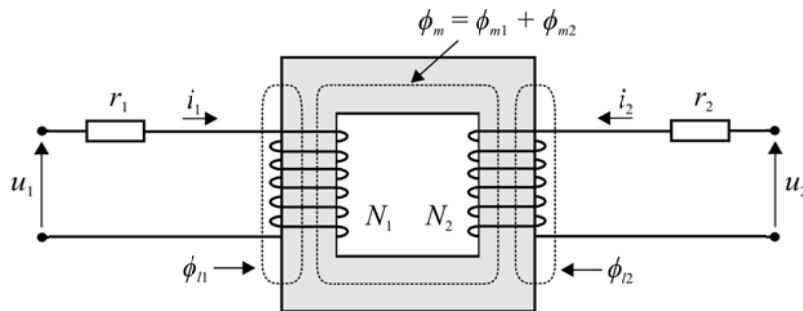
Joonis 5.1. Ühe mähisega magnetahel.

Magnetiliselt seotud mähistele (joonis 5.2) kehtivad seosed

$$u_1 = \frac{d\psi_1}{dt} + r_1 i_1, \quad u_2 = \frac{d\psi_2}{dt} + r_2 i_2 \quad (5.6)$$

$$\psi_1 = N_1(\phi_{m1} + \phi_{l1}) + N_1\phi_{m2}, \quad \psi_2 = N_2(\phi_{m2} + \phi_{l2}) + N_2\phi_{m1} \quad (5.7)$$

kus m ja l on vastastikuste (*mutual*) ja puistevoogude (*leakage*) tähised.



Joonis 5.2. Kahe mähisega magnetahel.

Omainduktiivsused (*self inductances*)

$$L_{11} = N_1(\phi_{m1} + \phi_{l1}) / i_1, \quad L_{11} = L_{m1} + L_{l1} \quad (5.8)$$

$$L_{22} = N_2(\phi_{m2} + \phi_{l2}) / i_2, \quad L_{22} = L_{m2} + L_{l2} \quad (5.9)$$

Siin on L_{m1} ja L_{m2} magnetimisinduktiivsused ning L_{l1} ja L_{l2} puisteinduktiivsused.

Vastastikused induktiivsused (*mutual inductances*)

$$L_{12} = N_1\phi_{m2} / i_2, \quad L_{21} = N_2\phi_{m1} / i_1 \quad (5.10)$$

Kuna

$$\phi_{m1} = N_1 i_1 P \quad \text{ja} \quad \phi_{m2} = N_2 i_2 P \quad (5.11)$$

siis

$$L_{12} = L_{21} = N_1 N_2 P \quad (5.12)$$

ning

$$\psi_1 = L_{11} i_1 + L_{12} i_2, \quad \psi_2 = L_{21} i_1 + L_{22} i_2 \quad (5.13)$$

Tuleb tähele panna vastastikuste magnetvoogude suundi. Ka on toodud seosed lineaarsed, mis ei pruugi alati kehtida.

Sünkroonmasina põhiseosed

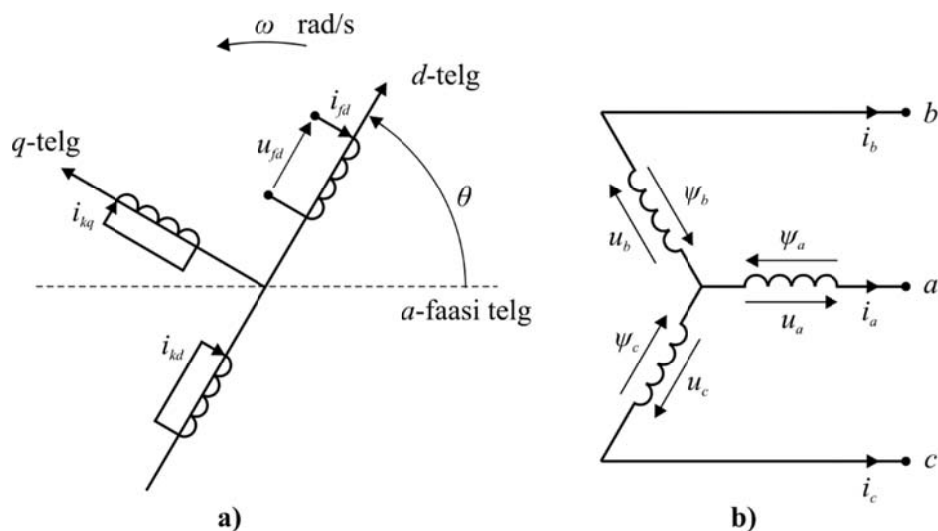
Esitatud seosed kehtivad ka sünkroonmasina kohta (joonis 5.3). Siin

fd – ergutusmähis (*field winding*)

kd, kq – summutuskontuurid (*amortisseur circuits*)

θ – d -telje ja a -faasi telje vaheline nurk

ω – rootori nurkkiirus rad/s.



Joonis 5.3. Sünkroonmasina staatori- ja rootoriahelad.

Summutusmähised on füüsiliselt olemas väljepoolustega masinatel. Peitpoolustega masinatel indutseeritakse vastavad voolud rootori kehas. Kummalgi juhul on summutusprotsessid keerukad, mistõttu neid modelleeritakse masina mõlemas teljes ühe või enama kontuuriga. Kontuuride indeks $k = 1, 2$ ja enam.

Tähistame:

u_a, u_b, u_c – staatori faasipinged

i_a, i_b, i_c – faaside voolud

u_{fd} – ergutuspinge (*field voltage*)

i_{fd}, i_{kd}, i_{kq} – ergutus- ja summutusahelate voolud

R_{fd}, R_{kd}, R_{kq} – ergutus- ja summutusahelate resistantsid

l_{aa}, l_{bb}, l_{cc} – staatori mähiste omainduktiivsused

l_{ab}, l_{bc}, l_{ca} – staatori mähiste vastastikused induktiivsused

$l_{afd}, l_{akd}, l_{akq}$ – staatori ja rootori mähiste vastastikused induktiivsused

$l_{ffd}, l_{kkd}, l_{kkq}$ – rootoriahelate omainduktiivsused

R_a, R_b, R_c – staatori mähiste resistantsid.

Staatori a -faasi pinge

$$u_a = p\psi_a - R_a i_a \quad (5.14)$$

$$\psi_a = -l_{aa}i_a - l_{ab}i_b - l_{ac}i_c + l_{afd}i_{fd} + l_{akd}i_{kd} + l_{akq}i_{kq} \quad (5.15)$$

Teiste faaside seosed on analoogsed. Ühikuteks on veeber (aheldusvoog), henri (induktiivsus) ja amper (vool). Kõik muutujad sõltuvad siin rootori asendist. Rootori pöörlemise tõttu on nii oma- kui vastastikused induktiivsused muutuvad, seda eriti väljepoolustega masinate korral.

Teisendus dq0

Avaldiste tuletamine sünkroonmasinat iseloomustavatele muutujatele, kui vaadelda rootori liikumist mingi fikseeritud telje suhtes, ei paku erilist raskust. Seosed tulevad siiski kohmakad ja on siinusfunktsioonide tõttu kasutamisel tülikad. Lihtsamad seosed saab, kui asendada staatorivoolud, pinged, aheldusvood ja elektromotoorjõud telgede d ja q suunaliste komponentidega. Kui vaadelda ka nulljärgnevuskomponenti

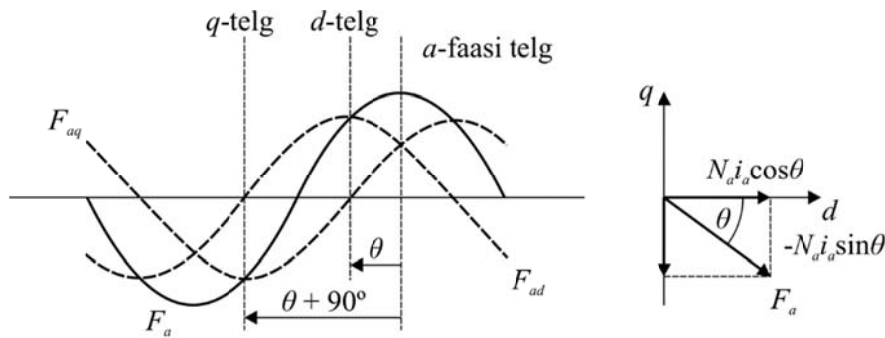
$$i_0 = 1/3(i_a + i_b + i_c) \quad (5.16)$$

võib faasivoolud i_a, i_b, i_c teisendada voolu komponentideks i_d, i_q, i_0 ja vastupidi. Maatrikskujul

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

Samalaadsed seosed kehtivad pinge ja staatori aheldusvoo kohta. Sisuliselt võib $dq0$ -teisen- dust selgitada ka nii, et siinuseliselt muutuvad suurused asendatakse kahe siinuskomponen- diga (kahe siinusfunktsiooni summa on siinusfunktsioon), millest üks vastab d -teljele, teine q - teljele (joonis 5.4).



Joonis 5.4. a -faasi magnetomotoorjõud ja selle komponendid.

Staatori ja rootori aheldusvoo $dq0$ -komponendid avalduvad kujul

$$\psi_d = -L_d i_d + L_{afd} i_{fd} + L_{akd} i_{kd} \quad (5.19)$$

$$\psi_q = -L_q i_q + L_{akq} i_{kq} \quad (5.20)$$

$$\psi_0 = -L_0 i_0 \quad (5.21)$$

$$\psi_{fd} = L_{ffd} i_{fd} + L_{fkd} i_{kd} - \frac{3}{2} L_{afd} i_d \quad (5.22)$$

$$\psi_{kd} = L_{fkd} i_{fd} + L_{kkd} i_{kd} - \frac{3}{2} L_{akd} i_d \quad (5.23)$$

$$\psi_{kq} = L_{kkq} i_{kq} - \frac{3}{2} L_{akq} i_q \quad (5.24)$$

Siin on kõik induktiivsused konstantsed ega sõltu rootori asendist. Võib tähele panna, et staa- tori ja rootori vahelised seosed ei ole pööratavad. Näiteks põhjustab staatorivool i_d rootori aheldusvoo komponendi $3/2 L_{afd} i_d$, rootorivool i_{fd} aga staatoris komponendi $L_{afd} i_{fd}$. See ja muud sarnased vastuolud likvideeritakse sobivate baassuuruste valikuga üleminekul suhtühikutele.

Pinge $dq0$ -komponendid avalduvad kujul

$$u_d = p\psi_d - \psi_q p\theta - R_a i_d \quad (5.25)$$

$$u_q = p\psi_q + \psi_d p\theta - R_a i_q \quad (5.26)$$

$$u_0 = p\psi_0 - R_a i_0 \quad (5.27)$$

Siin on θ a -faasi ja rootori d -telje vaheline nurk. Püsitalitluses $p\theta = \omega = 314$ rad/s. Elektromotoorjõud $\psi_q p\theta$ ja $\psi_d p\theta$, mis tulenevad rootori liikumisest staatori suhtes, on pinge põhilisteks komponentideks. Seevastu komponendid $p\psi_d$ ja $p\psi_q$ on tingitud aheldusvoo muutmise ajas ja võivad tulla esile vaid siirdeprotsesside ajal.

Elektriline võimsus

$$P_e = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c = \frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q + 2u_0 i_0) \quad (5.28)$$

$$P_e = \frac{3}{2}[(i_d p\psi_d + i_q p\psi_q + 2i_0 p\psi_0) + (\psi_d i_q - \psi_q i_d)\omega - (i_d^2 + i_q^2 + 2i_0^2)R_a] \quad (5.29)$$

Siin väljendab avaldise esimene liige staatori elektromagnetilise energia muutust, teine liige võimsust, mis kantakse üle läbi õhupilu, ja kolmas liige kadusid staatoris.

Rootori elektriline moment (*air-gap torque*) vastab õhupilu kaudu ülekantud võimsusele jagatuna rootori mehaanilise kiirusega

$$M_e = \frac{3}{2}(\psi_d i_q - \psi_q i_d) \frac{\omega}{\omega_m} = \frac{3}{2}(\psi_d i_q - \psi_q i_d) q_f \quad (5.30)$$

kus q_f – pooluspaaride arv.

$dq0$ -teisendust võib vaadelda kui staatori taandamist rootorile, vastupidist aga kui rootori taandamist staatorile. $dq0$ -teisenduse eelisteks on

- induktiivsused võrrandites on konstantsed
- balansseeritud talitluses puudub nullkomponent
- püsitalituses staatori suurused on konstantsed. Perioodilise stabiilsuse korral vaadeldakse sageduse muutumist 2...3 Hz ulatuses
- d - ja q -teljega seotud parameetreid võib testimisel otse mõõta.

$dq0$ -teisendust võib pidada samaväärseks siinuseliselt muutuvate suuruste faasoriga asendamise. Allpool vaadeldaksegi faasorige rakendamist sünkroonmasina kirjeldamisel.

Sünkroonmasina põhiseosed suhtühikutes

Suhtühikute rakendamine lihtsustab avaldise ja teeb suurused paremini võrreldavaks. Kuigi baasuühikute valimine on põhimõtteliselt suvaline, tuleb pürgida tulemuste lihtsusele. Staatori baassuurusteks on loomulik valida sünkroonmasina nimipinge (faasipinge) ja nimivoolu maksimaalväärtused (vaatleme seni hetkväärtusi) ning nimisagedus. Nendest tulenevad ülejäänud baassuurused. Kui suhtelisi suurusi tähistada samal viisil kui ühikutega suurusi, siis staatori seosed ei muutu. Rootori baasuühikute valikul on mitu võimalust. Baasuühikute L_{ad} -süsteemi (L_{ad} -base reciprocal per unit system) eesmärk on, et suhtühikutes staatori ja rootori vastastikused induktiivsused oleksid pööratavad, näiteks $L_{afd} = L_{fda}$, ning oleksid võrdsed kõigile sama telje kontuuridele, näiteks $L_{afd} = L_{akd}$. Kokku võttes

$$L_{afd} = L_{fda} = L_{akd} = L_{kda} = L_{ad} \quad (5.31)$$

$$L_{akq} = L_{kqa} = L_{aq}, \quad L_{fkd} = L_{kdf} \quad (5.32)$$

Sünkroonmasina põhiseosed suhtelistes ühikutes kujunevad järgmiseks:

- staatori pinged

$$u_d = p\psi_d - \psi_q\omega - R_a i_d \quad (5.33)$$

$$u_q = p\psi_q + \psi_d\omega - R_a i_q \quad (5.34)$$

$$u_0 = p\psi_0 - R_a i_0 \quad (5.35)$$

- rootori pinged

$$u_{fd} = p\psi_{fd} + R_{fd} i_{fd} \quad (5.36)$$

$$0 = p\psi_{1d} + R_{1d} i_{1d} \quad (5.37)$$

$$0 = p\psi_{1q} + R_{1q} i_{1q} \quad (5.38)$$

$$0 = p\psi_{2q} + R_{2q} i_{2q} \quad (5.39)$$

- staatori aheldusvood

$$\psi_d = -(L_{ad} + L_l) i_d + L_{ad} i_{fd} + L_{ad} i_{1d} \quad (5.40)$$

$$\psi_q = -(L_{aq} + L_l) i_q + L_{aq} i_{1q} + L_{aq} i_{2q} \quad (5.41)$$

$$\psi_0 = -L_0 i_0 \quad (5.42)$$

- rootori aheldusvood

$$\psi_{fd} = L_{ffd} i_{fd} + L_{f1d} i_{1d} - L_{ad} i_d \quad (5.43)$$

$$\psi_{1d} = L_{f1d} i_{fd} + L_{11d} i_{1d} - L_{ad} i_d \quad (5.44)$$

$$\psi_{1q} = L_{11d} i_{qd} + L_{aq} i_{2d} - L_{aq} i_q \quad (5.45)$$

$$\psi_{2q} = L_{aq}i_{1q} + L_{22q}i_{2d} - L_{aq}i_q \quad (5.46)$$

- rootori elektriline moment

$$M_e = \psi_d i_q - \psi_q i_d \quad (5.47)$$

Seostes vastavad indeksid 1 ja 2 arvutuslikele summutuskontuuridele. Kui pikiteljel vaadeldakse ühte, siis põikteljel kahte kontuuri. Staatori aheldusvoos vaadeldakse eraldi puistevoogu ja sellele vastavat induktiivsust L_l . Suhtelistes ühikutes on ka aeg suhteline

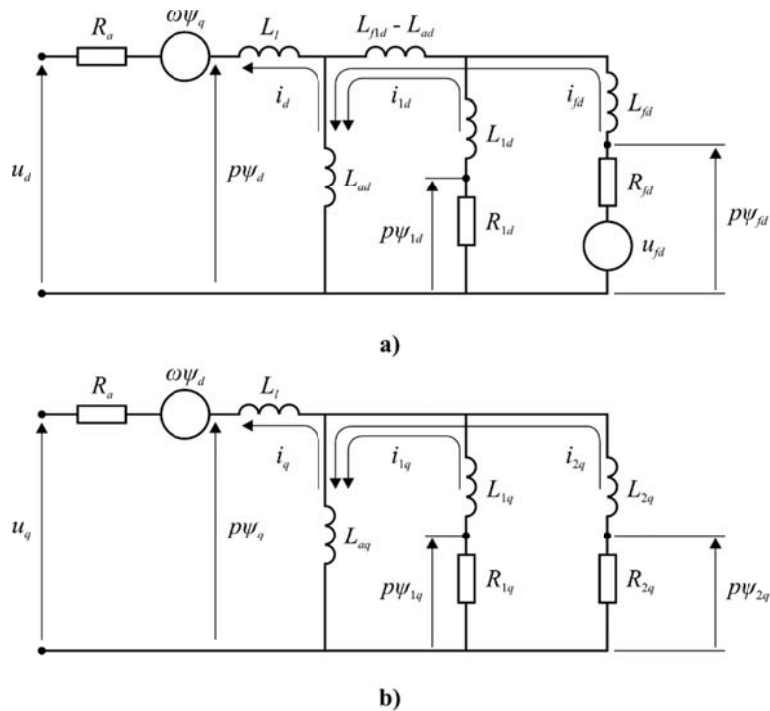
$$t = \frac{1}{\omega_0} = \frac{1}{2\pi f_0} \quad (5.48)$$

Kui soovitakse aega väljendada sekundites, siis tuleb avaldistes diferentseerimisoperaator p asendada operaatoriga p/ω_0 . Märgime veel, et reaktiivtakistused, mis nõiühikutes on näiteks $X_d = \omega L_d$, võrduvad suhtelistes ühikutes vastava induktiivsusega ($X_d = L_d$ jt).

Ülaltoodud seosed väljendavad sünkroonmasina dünaamikat. Seoste $dq0$ -kuju nimetatakse ka Parki võrranditeks ja need põhinevad Blondeli kahe reaktsiooni teoorial. Sünkroonmasina põhiseoste illustreerimiseks võib koostada aseskeemid (joonis 5.5). Skeemidel

$$L_{fd} = L_{ff} - L_{fd}, \quad L_{1d} = L_{11} - L_{fd}, \quad L_{1q} = L_{11} - L_{aq}, \quad L_{2q} = L_{22} - L_{aq}$$

Siin induktiivsus $L_{fd} - L_{ad}$, on tühine, seda eriti peitpoolustega masina puhul.



Joonis 5.5. d -telje (a) ja q -telje (b) aseskeemid.

Sünkroonmasina talitus

Püsitalitus

Sümmeetrilises püsitalitluses on kõik tuletised nullid, nulljärgnevuskomponent puudub ja sagedusel on nimiväärtus, mistõttu $\omega = 1$ Ka summutuskontuuride voolud on nullid. Otstarbekas on võtta kasutusele faasorid. Kuna dq -komponendid on konstandid, mitte siinussuurused, võib pinge ja voolu faasorid esitada kui

$$\underline{U} = u_d + ju_q, \quad \underline{I} = i_d + ji_q \quad (5.49)$$

Seejuures

$$u_d = X_q i_q - R_a i_d, \quad u_q = -X_d i_d + X_{ad} i_{fd} - R_a i_q \quad (5.50)$$

kus X_d ja X_q on piki- ja põiktelje sünkroontakistused

$$X_d = X_{ad} + X_l, \quad X_q = X_{aq} + X_l \quad (5.51)$$

Takistused X_{ad} , X_{aq} ja X_l on suhtelistes ühikutes võrdsed vastavate induktiivsustega.

Vaadelda võib veel q -teljel paiknevat elektromotoorjõudu

$$\underline{E}_q = \underline{U} + (R_a + jX_q)\underline{I} = j[X_{ad} i_{fd} - (X_d - X_q) i_d] \quad (5.52)$$

ning koostada vektordiagramm ja aseskeem, mis langevad kokku joonisel 2.14 tooduga, kui panna tähele, et $E_q = E_Q$, ning muid vastavusi.

Aktiiv- ja reaktiivvõimsus ning moment

$$S = \underline{U}\underline{I}^*, \quad P = u_d i_d + u_q i_q, \quad Q = u_q i_d - u_d i_q \quad (5.53)$$

$$M_e = \psi_d i_d - \psi_q i_q = (u_d i_d + u_q i_q) + R_a (i_d^2 + i_q^2) = P + R_a I^2 \quad (5.54)$$

Siirdetalitus

Võimalikest siirdetalitlustest vaatleme esmalt olukorda kolmefaasilisel lühisel. Lihtsas RL -ahelas

$$u = L \frac{di}{dt} + Ri \quad (5.55)$$

Lahendades selle i suhtes, saame

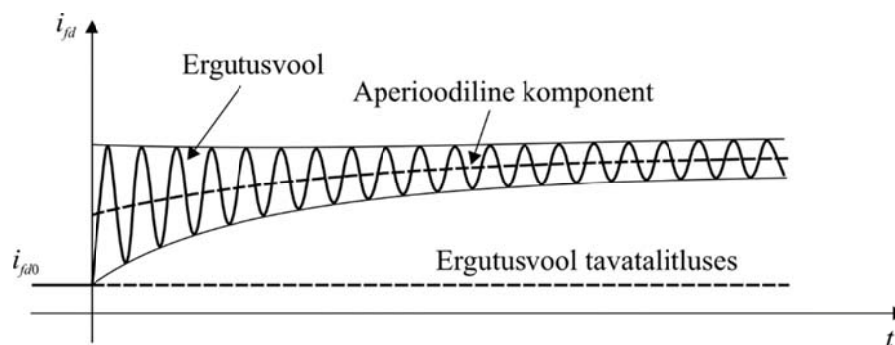
$$i = Ke^{-\frac{R}{L}t} + \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \quad (5.56)$$

kus

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}, \quad \varphi = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right), \quad K = i_0 - \frac{U_m}{Z} \sin(\alpha - \varphi) \quad (5.57)$$

Voolus võib eristada aperioidilist ja perioodilist komponenti, mille summa vahetult pärast lühist on 0. Aperioidiline komponent sumbub ajakonstandiga L/R .

Sünkroonmasina lühise korral võib eristada perioodilist komponenti (*fundamental frequency component*), mis on algul suur ja sumbub seejärel püsitalitluse väärtuseni, ning aperioidilist komponenti (*unidirectional component, dc offset*), mis sumbub eksponentsiaalselt mõne perioodi vältel. Perioodilise komponendi suurem lähteväärtus on tingitud protsessidest ergutusmähises ja summutusahelates. Seejuures sumbuvad protsessid summutusahelates tunduvalt kiiremini kui ergutusmähistes. Ka rootoriahelas tekib aperioidiline ja perioodiline komponent (joonis 5.6).



Joonis 5.6. Ergutusvoolu muutus tingituna staatori lühisest.

Staatori aperioidilise komponendi arvestamine teeb sünkroonmasina stabiilsuse käsitlemise keerukaks, mistõttu seda tavaliselt ei vaadelda. Pealegi sumbub aperioidiline komponent kiiresti. Formaalselt tähendab see, et võrranditest

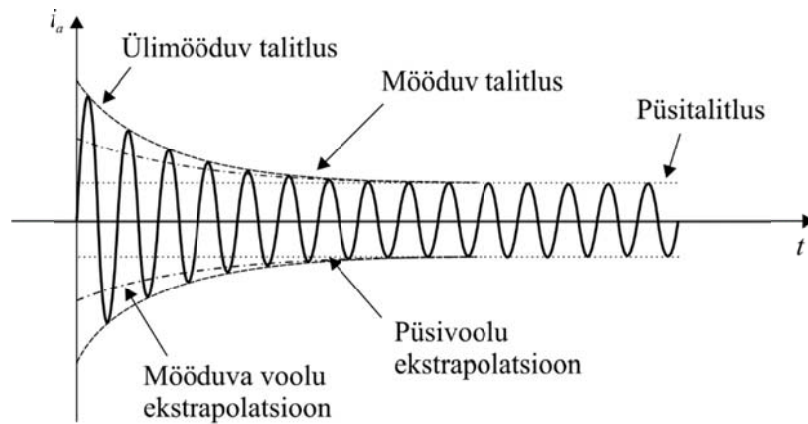
$$u_d = p\psi_d - \omega\psi_q - R_a i_d, \quad u_q = p\psi_q + \omega\psi_d - R_a i_q \quad (5.58)$$

jäetakse ära komponendid $p\psi_d$ ja $p\psi_q$. Seega vaadeldakse ainult staatorivoolu perioodilist komponenti (joonis 5.7).

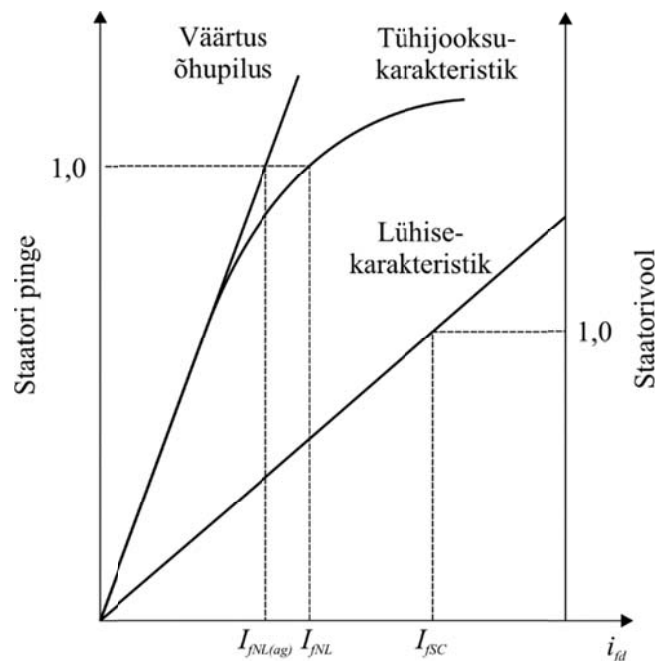
Magnetahelate küllastumine

Seni oleme seoseid vaadelnud lineaarsetena, jättes arvestamata magnetahela küllastumise. Küllastus ilmneb kõige enam tühijooksul avatud staatoriahela korral. Tühijooksupinge (*open-circuit terminal voltage, OC*) sõltuvus ergutusmähise voolust i_{fd} ehk tühijooksukarakteristik (*open-circuit characteristic, OCC*) väljendab pikitelje küllastumist. Seevastu lühisekarakte-

ristikul (*short-circuit characteristic, SCC*), mis on saadud püsiva kolmefaasilise lühise korral, küllastumine puudub, sest ankrureaktsiooni tõttu on magnetvälja tugevus väike (joonis 5.8).



Joonis 5.7. Staatorivoolu perioodiline komponent.



Joonis 5.8. Tühijooksu- ja lühisekarakteristik.

Masina takistus X_d küllastumata ja küllastunud olukorras on

$$X_{du} = \frac{I_{fSC}}{I_{fNL(ag)}} \quad \text{ja} \quad X_{ds} = \frac{I_{fSC}}{I_{fNL}} \quad (5.59)$$

Siin on I_{fNL} (*no load*) ja I_{fSC} (*short-circuit*) ergutusvoolu väärtused, mis tagavad nimipinge tühijooksul ja nimivoolu lühisel.

Lühisesuhe (*short-circuit ratio, SCR*)

$$SCR = \frac{I_{fNL}}{I_{fSC}} = \frac{1}{X_{ds}} \quad (5.60)$$

väljendab küllastumise astet. Mida väiksem on lühisesuhte seda enam tuleb muuta ergutust, et säilitada pinge muutuva voolu korral. Teisalt tähendab väiksem lühisesuhte odavamaid generaatoreid.

Stabiilsuse käsitlemisel võetakse arvesse, et

- lekkeinduktiivsused ei küllastu; küllastuvad vaid vastastikused induktiivsused L_{ad} ja L_{aq}
- küllastumine on määratud õhupilu aheldusvooga (*air-gap flux linkage*)
- küllastumist võib arvestada tühijooksukarakteristiku alusel
- d - ja q -ahelad ei ole magnetiliselt seotud

$$L_{ad} = K_{sd} L_{adu}, \quad L_{aq} = K_{sq} L_{aqu} \quad (5.61)$$

kus L_{adu} ja L_{aqu} on L_{ad} ja L_{aq} küllastumata väärtused ja K_{sd} ja K_{sq} küllastustegurid.

Tühijooksukarakteristiku alusel on d -telje küllastustegur

$$K_{sd} = \frac{\psi_a}{\psi_{a0}} \quad \text{või} \quad K_{sd} = \frac{I_0}{I} \quad (5.62)$$

kus $\psi_a = \sqrt{\psi_{ad}^2 + \psi_{aq}^2}$ on õhupilu aheldusvoog.

Kui vaadelda aheldusvoo komponenti $\psi_I = \psi_{a0} - \psi_a$, siis on küllastustegur

$$K_{sd} = \frac{\psi_a}{\psi_a + \psi_I} = \frac{\psi_{a0} - \psi_I}{\psi_{a0}} \quad (5.63)$$

Tühijooksukarakteristiku võib jagada kolme segmenti. Esimeses segmendis komponent $\psi_I = 0$. Teises ja kolmandas segmendis võib komponendile ψ_I leida sobivad matemaatilised aproksimatsioonid.

Küllastusteguri K_{sq} võib väljepoolustega masinale lugeda võrdseks ühega. Peitpoolustega masinale võib lihtsuse mõttes võtta $K_{sq} = K_{sd}$. Esitatud küllastuse arvutusviis on ligikaudne. Kasutusel on ka täpsemad meetodid.

Võnkumisvõrrand

Seni oleme vaadelnud sünkroonmasina elektrilisi seoseid. Stabiilsuse käsitlemisel on vaja vaadelda ka rootori liikumise mehaanilist võrrandit. Rootori pöörlemist kirjeldab võrrand

$$Jp^2\gamma_m = M_m - M_e \quad (5.64)$$

kus

J – rootori inertsimoment

θ_m – mehaaniline nurk

M_m ja M_e – generaatori mehaaniline ja elektriline moment.

Seda võrrandid saab suhtelistes ühikutes esitada

$$\frac{T_J}{\omega_0} p^2 \delta = M_m - M_e \text{ ehk } \frac{T_J}{\omega_0} p^2 \delta \approx P_0 - P \quad (5.65)$$

Siin on inertsikonstant T_J defineeritud kui mehaaniline käivitusaeg, s.o aeg, mis on vajalik selleks, et kiirendada nimimomendiga rootorit nullist kuni nimikiiruseni. Kui inertsikonstanti vaadelda kui rootori kineetilist energiat suhtelistes ühikutes, nii nagu sageli tehakse, tuleb võrrandis T_J asendada suurusega $2T_J$.

Rootori liikumisvõrrandisse, mida nimetatakse ka võnkumisvõrrandiks (*swing equation*), tuleb üldjuhul lisada veel kiiruse hälbega proportsionaalne summutuskomponent

$$\frac{T_J}{\omega_0} p^2 \delta = M_m - M_e - K_D \Delta\omega \quad (5.66)$$

kus K_D on summutustegur ja

$$\Delta\omega = \frac{d\delta}{dt} \quad (5.67)$$

Seega

$$\frac{T_J}{\omega_0} p^2 \delta = M_m - M_e - K_D \frac{d\delta}{dt} \quad (5.68)$$

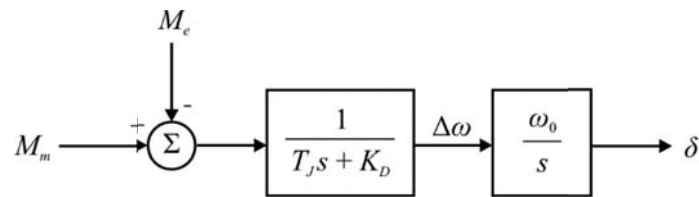
Siin on inertsikonstant T_J sekundites ja aeg suhtelistes ühikutes t / ω_0 .

Stabiilsuse arvutamisel vaadeldakse olekuruumi (*state-space form*), kus on kasutusel esimest järku diferentsiaalvõrrandid. Võnkumisvõrrandile vastavad esimest järku võrrandid on

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{T_J} (M_m - M_e - K_D \Delta\omega) \quad (5.69)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_0 \Delta\omega \quad (5.70)$$

kus suurused $\Delta\omega$, M_m ja M_e on suhtelistes ühikutes, aeg t sekundites ja nurkkiiruse ω_0 ühikuks on radiaani sekundis. Neile seosteile vastava võnkumisvõrrandi plokk skeem on joonisel 5.9.



Joonis 5.9. Võnkumisvõrrandi plokk skeem.

Sünkroonmasina parameetrid

Põhiseoste praktiliseks rakendamiseks on vajalikud sünkroonmasina parameetrid. Sünkroonmasina võrrandite parameetriteks on induktiivsused ja resistantsid ning vastavad ajakonstandid. Neid masina põhiparameetreid (*fundamental or basic parameters*) ei saa aga masina katsetamisel otse mõõta. Seetõttu vaadeldakse lähteparameetreid, mis katsetega kindlaks tehakse ja mille kaudu võib põhiparameetreid määrata. Tehakse lühisekatseid, staatorivoolu sumbumiskatseid (*decrement test*), eriti aga sagedustundlikkuse (*frequency-response*) katseid. Kõige üldisemalt võib lähteparameetreid määrata, kui vaadelda sünkroonmasinat nagu dünaamilist süsteemi ja rakendada operaatoranalüüsi meetodeid.

Talitlushäiringu korral indutseeritakse rootoriahelatesse voolud, mille komponendid sumbuvad erineva kiirusega. Kiiresti sumbuvatele voolukomponentidele vastavad ülিমööduvad parameetrid (*subtransient parameters*), aeglasemalt sumbuvatele komponentidele mööduvad parameetrid (*transient parameters*) ning mittesumbuvatele komponentidele sünkroonparameetrid (*synchronous parameters*). Põhiparameetritest ajakonstandid T'_{d0} ja T''_{d0} ning T'_d ja T''_d näitavad mööduvate ja ülímööduvate voolukomponentide sumbumist vastavalt avatud ning lühistatud staatoriahela korral.

Induktiivsused, mis iseloomustavad d -telje protsesse püsitalitluses ning mööduvas ja ülímööduvas talitluses on vastavalt L_d , L'_d ja L''_d . Füüsikalise ettekujutuse järgi talitlushäiringu alg hetkel suletud magnetahelate aheldusvood ei muutu ehk $\Delta\psi_{fd} = 0$ ja $\Delta\psi_{1d} = 0$, mistõttu rootorile vastab aseskeem joonisel 5.10.

Aseskeemi kohaselt

$$L''_d = L_l + \frac{L_{ad} L_{fd} L_{1d}}{L_{ad} L_{fd} + L_{ad} L_{1d} + L_{fd} L_{1d}} \quad (5.71)$$

Mööduvas talitluses protsessid summutusmähises on juba sumbunud ja $L_{1d} = \infty$. Seega

$$L'_d = L_l + \frac{L_{ad}L_{fd}}{L_{ad} + L_{fd}} \quad (5.72)$$

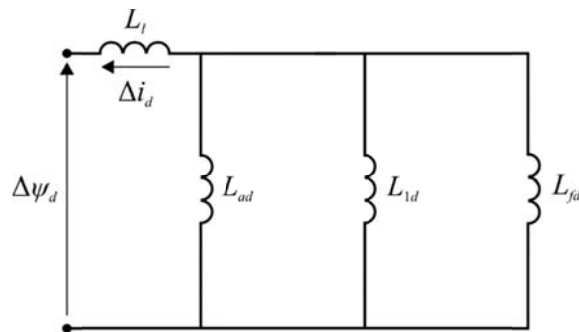
q -telje sünkroon-, mööduv ja ülimööduv induktiivsus avalduvad analoogselt d -teljega

$$L_q = L_{aq} + L_l \quad (5.73)$$

$$L'_q = L_l + \frac{L_{aq}L_{1q}}{L_{aq} + L_{1q}} \quad (5.74)$$

$$L''_q = L_l + \frac{L_{aq}L_{1q}L_{2q}}{L_{aq}L_{1q} + L_{aq}L_{2q} + L_{1q}L_{2q}} \quad (5.75)$$

Toodud seosed põhinevad muuhulgas eeldustel, et ülimööduval perioodil $R_{fd} = R_{1q} = 0$ ja mööduval perioodil $R_{1d} = R_{2q} = \infty$. Teatud olukordades põhjustavad need eeldused siiski vigu.



Joonis 5.10. Aseskeem vahetult pärast talitlushäiringut.

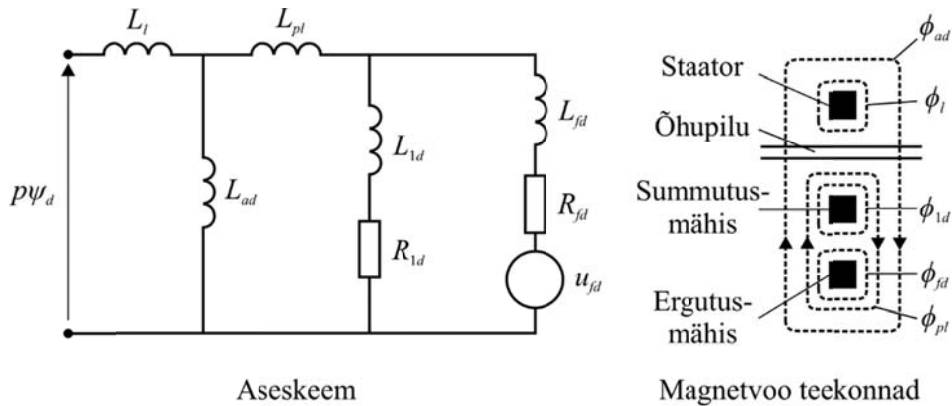
Põhiparameetrite avaldised on seni tuletatud eeldusel, et kõik d -telje vastastikused induktiivsused on võrdsed. Selline eeldus on kasutatav staatorisuuruste tuletamisel, kuid võib põhjustada vigu rootorisuurustes. Oleks vajalik, et ergutusmähise ja summutusmähise vastastikust induktiivsust vaadeldaks eraldi, nagu näidatud joonisel 5.11. Siin vastab induktiivsus $L_{pl} = L_{fd} - L_{ad}$ lekkevoole ϕ_{pl} , mis haarab ergutus- ja summutusmähiseid, kuid staatori mähise mitte. Toodud aseskeemi järgi võib leida põhiparameetrite täpsemad avaldised.

Mudel, kus q -teljel on kaks summutuskontuuri, sobib hästi peitpoolustega masinale. Väljepoolustega masinal on vaid üks summutusmähise tähiselega $1q$ osutatud kontuur. Teine kontuur, mille tähiseks on $2q$, puudub. Ühtlasi ei ole siin vahet püsitalitluse ja mööduva talitluse vahel. Seega q -telje parameetrid on

$$L_q = L_l + L_{aq} \quad (5.76)$$

$$L_q'' = L_l + \frac{L_{aq}L_{lq}}{L_{aq} + L_{lq}} \quad (5.77)$$

Kuna d -teljel vaadeldakse kahte rootorimähist (ergutus- ja summutusmähist), siis on peitpoolustega masinale saadud seosed rakendatavad ka väljepoolustega masinale.



Joonis 5.11. Aseskeem mittevõrdsete vastastikuste induktiivsuste korral.

Praktikas kasutatakse induktiivsuste asemel reaktantse, mis suhtelistes ühikutes on võrdsed. Sünkroongeneraatorite põhiparameetrite suurusvahemikud on tabelis 5.1. Tabelis esitatud takistused on näidatud generaatori nimiaandmete suhtes. Ajakonstandid vastavad avatud staatoriahelale. Kuna takistuste väärtused tabelis on suhtelistes ühikutes, siis kõlbavad need ka 50 Hz korral, kuigi lähteallikas on pärit USAst, kus sageduseks on 60 Hz. Võib tähele panna, et

$$X_d \geq X_q > X'_q \geq X'_d > X''_q \geq X''_d \quad (5.78)$$

$$T'_{d0} > T'_d > T''_{d0} > T''_d > T_{kd}, \quad T'_{q0} > T'_q > T''_{q0} > T''_q \quad (5.79)$$

Kui puuduvad täpsemad andmed, võib võtta, et $X'_q = 2X''_q$ ja $T'_q = 10T''_q$.

Kolmefaasilise lühise korral staatoris tekkiv aperioidiline komponent tekitab statsionaarse magnetomotoorjõu, mis indutseerib rootoris põhisagedusega voolu. Vastav aheldusvoog haarab samu magnetkontuure, mis on iseloomulikud induktiivsustele L''_d ja L''_q , aga ka vastujärgnevusinduktiivsusele L_2 . Seetõttu sumbub aperioidiline komponent ankru ajakonstandiga (*armature time constant*)

$$T_a = \frac{1}{R_a} \left(\frac{L''_d + L''_q}{2} \right) \quad (5.80)$$

mis on 0,03...0,35 s.

Tabel 5.1. Sünkroongeneraatorite parameetrid.

Parameeter		Hüdrogeneraator	Turbogeneraator
Sünkroontakistus	X_d	0,6...1,5	1,0...2,3
	X_q	0,4...1,0	1,0...2,3
Mööduv takistus	X'_d	0,2...0,5	0,15...0,40
	X'_q	–	0,3...1,0
Ülimööduv takistus	X''_d	0,15...0,35	0,12...0,25
	X''_q	0,20...0,45	0,12...0,25
Mööduv ajakonstant	T'_{d0}	1,5...9,0 s	3,0...10,0 s
	T'_{q0}	–	0,5...2,0 s
Ülimööduv ajakonstant	T''_{d0}	0,01...0,05 s	0,02...0,05 s
	T''_{q0}	0,01...0,09 s	0,02...0,05 s
Staatori puistetakistus	X_l	0,1...0,2	0,1...0,2
Staatori resistants	R_a	0,002...0,020	0,0015...0,0050

Sünkroonmasina põhiseoste lihtsustused

Eespool vaadeldud põhivõrrandid kirjeldavad küllaltki täpselt protsesse sünkroonmasinas. Võrrandite rakendamine suurte süsteemide stabiilsuse käsitlemisel eeldab siiski lihtsustuste tegemist. Vastasel juhul kujuneksid arvutused liiga mahukaks.

Põhilisteks lihtsustusteks on staatori pingekomponentide $p\psi_d$ ja $p\psi_q$ ning rootori kiirushälvete arvestamata jätmine. Komponentide $p\psi_d$ ja $p\psi_q$ eiramine tähendab, et siirdeprotsesse staatoris ei vaadelda. Vaadeldav lihtsustus ei põhjusta olulisi vigu, kuna siirdeprotsessid staatoris ja kogu võrgus sumbuvad kiiresti. Märkime, et kuna need protsessid on perioodilised, tähendaks vastavate diferentsiaalvõrrandite numbriline lahendamine ajaintervallide lühendamist ja seega arvutuste mahu suurenemist paari suurusjärgu võrra.

Kõnealuste komponentide ignoreerimine tähendab siiski seda, et jäetakse arvestamata rootori momendi kahte komponenti: ergutusmähise resistantsist tingitud aperioidilist (*dc braking torque*) ja perioodilist komponenti. Need komponendid pidurdavad rootori esialgset liikumist, mistõttu nende arvutamine võib olla stabiilsuse määramisel oluline. Kuna $p\psi$ -komponentide arvutamine on arvutuslikul põhjusel raskendatud, võetakse neid arvesse kaudselt.

Teiseks levinud lihtsustuseks on eeldus, et magnetvälja pöörlemiskiirus on konstantne $\omega = \omega_0 = 1$ suhtelistes ühikutes. See lihtsustus ei muuda küll arvutuste mahtu, kuid kompen-

seerib mõningal määral $p\psi$ -komponentide eiramist. Kõik muud sünkroonmasina põhivõrrandid jäävad muutumatuks.

Edasise lihtsustamise võimaluseks on summutusmähise mõju eiramine. Ülaltoodud staatori võrrandid jäävad siis kehtima. Ülejäänud põhivõrrandid saavad kuju

$$\psi_d = -L_d i_d + E_q \quad (5.81)$$

$$\psi_q = -L_q i_q \quad (5.82)$$

$$E'_q = E_q - (L_d - L'_d) i_d \quad (5.83)$$

$$pE'_q = \frac{1}{T'_{d0}} (U_{fd} - E_q) \quad (5.84)$$

Kui vaadeldav ajavahemik on lühike võrreldes ajakonstandiga T'_{d0} , siis võib lugeda konstantseks suuruse E'_q (või ψ_{fd}). Selle eeldusega kaob põhivõrranditest viimanegi diferentsiaalvõrrand. Kui lisaks lugeda, et $X'_d = X'_q$, ignoreerides rootoriahela ebasümmeetriat mööduvas talitluses, ning et ka ψ_{1q} (mis on seotud reaktantsiga X'_q) on konstantne, siis on generaatori pinge mööduva impetantsi $R_a + jX'_d$ taga konstantse amplituudiga. Vaadeldud tingimustel on kummalgi teljel vaid üks kontuur.

Kuna aheldusvood ψ_{fd} ja ψ_{1q} on konstantsed, siis on ka E' konstantne. Kui nüüd rootori nurk muutub, siis pöördub vastavalt ka elektromotoorjõud E' . Suuruse E' amplituudi saab häiringueelsest talitlusest (U_0, I_0)

$$\underline{E}' = \underline{U}_0 + (R_a + jX'_d) \underline{I}_0 \quad (5.85)$$

Resistantsist R_a võib siin enamasti loobuda. Vaadeldud seoseid nimetatakse klassikaliseks mudeliks (*classical model*).

Sünkroonmasina võrrandid võib teisendada staatorisuurusteks, jättes resistantsi arvestamata, järgmiselt:

$$T''_{d0} pE''_q = E'_q - E''_q + I_d (X'_d - X''_d) \quad (5.86)$$

$$T''_{q0} pE''_d = E'_d - E''_d - I_q (X'_q - X''_q) \quad (5.87)$$

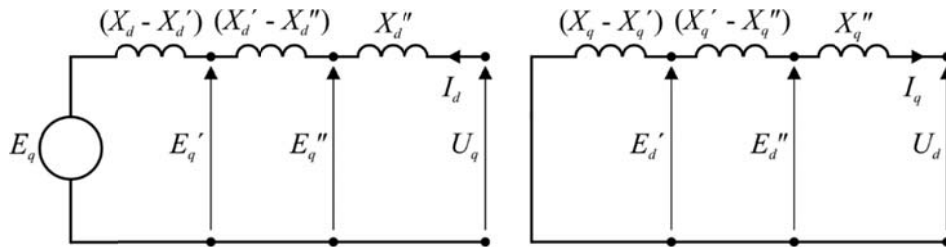
$$T'_{d0} pE'_q = E_q - E'_q + I_d (X_d - X'_d) \quad (5.88)$$

$$T'_{q0} pE'_d = -E'_d - I_q (X_q - X'_q) \quad (5.89)$$

Esitatud seostele vastavad sünkroonmasina d - ja q -telje aseskeemid joonisel 5.12. Lisanduvad veel rootori liikumisvõrrandid

$$T_J p\Delta\omega = M_m - M_e - K_D\Delta\omega \quad (5.90)$$

$$p\delta = \Delta\omega \quad (5.91)$$



Joonis 5.12. Staatori d - ja q - telje aseskeemid.

Kokku võttes kirjeldab sünkroonmasina siirdeprotsesse kuus diferentsiaalvõrrandit, mida võib modelleerimise täpsusest sõltuvalt lihtsustada. Sünkroonmasina mudeleid on tavaks liigitada neis esinevate diferentsiaalvõrrandite arvu järgi järgmiselt:

- Mudel 6 $\dot{E}_d'', \dot{E}_q'', \dot{E}_d', \dot{E}_q', \dot{\omega}, \dot{\delta}$ on kõige täiuslikum mudel, kus on arvestatud nii ülimalduvaid kui mõõduvaid protsesse, rootoriahelate ebasümmeetriat ning vaadeldakse ka rootori pöörlemiskiiruse ja nurga muutusi. Kuna protsessidega summutuskontuurides on arvestatud, siis summutustegurit ei vajata ($K_D = 0$). Generaatori võimsus väljendub seosega

$$P = (E_d'' I_d + E_q'' I_q) + (X_d'' - X_q'') I_d I_q \quad (5.92)$$

- Mudelis 5 $\dot{E}_d'', \dot{E}_q'', \dot{E}_q', \dot{\omega}, \dot{\delta}$ on loobutud pöörivoolude arvestamisest q -teljel (turbogeneraator), mille tõttu $X_q' = X_q$ ja $E_d' = 0$ ning vastavat diferentsiaalvõrrandit ei rakendata. Generaatori võimsuse avaldis on sama, mis eelmises mudelis ning ka summutustegurit võib ignoreerida.
- Mudelis 4 $\dot{E}_d', \dot{E}_q', \dot{\omega}, \dot{\delta}$ on loobutud summutusprotsesside arvestamisest. Seetõttu on rootori liikumisvõrrandis summutustegurit K_D vaja arvestada. Generaatori võimsus avaldub kujul

$$P = (E_d' I_d + E_q' I_q) + (X_d' - X_q') I_d I_q \quad (5.93)$$

Enamasti arvatakse, et see mudel on piisava täpsusega elektromehaanilise dünaamika (nt nurgastabiilsuse) arvutamisel.

- Mudel 3 $\dot{E}'_q, \dot{\omega}, \dot{\delta}$ erineb eelmisest selles, et elektromotoorjõud E'_d loetakse konstantseks. Kuna ka põiktelje pöörivoolude arvestamisest loobutakse, siis $E'_d = 0$. Summutustegurit K_D on vaja arvestada ning generaatori võimsus taandub kujule

$$P = E'_q I_q + (X_d - X_q) I_d I_q \quad (5.94)$$

- Mudel 2 $\dot{\omega}, \dot{\delta}$ on klassikaline mudel, kus konstantseks loetakse elektromotoorjõud E' , mis aseskeemis paikneb mööduva takistuse X'_d taga. Mudel põhineb eeldusel, et mööduv elektromotoorjõud $E'_q \approx const$, kuna ajakonstant T'_{d0} võib ulatuda mitme sekundini. Vaadeldavat mudelit kasutatakse laialdaselt elektrisüsteemi siirdeprotsesside lihtsustatud käsitlemisel. See mudel sobib hästi generaatorite jaoks, mis paiknevad häiringu kohast eemal. Ka kirjeldab mudel piisavalt täpselt siirdeprotsesse rootorite esimese vönke ajal.

5.2 Elektrivõrgu koormus

Elektrisüsteemi töö põhimõtteks on elektrijaamades genereeritud elektri ülekandmine tarbijatele, elektrivõrgu koormusele. Nii süsteemi töö staatika kui dünaamika sõltuvad oluliselt koormuse iseloomust. Koormuse modelleerimise teeb raskeks tarbijate suur hulk ja nende eripärad. Arvutustes tuginetakse koormuse ekvivalentsetele karakteristikutele, mis võtavad arvesse enamiku elektritarbijaid. Eraldi vaadeldakse asünkroonmootoreid, sest nende osakaal on suur ja mõju süsteemi stabiilsusele oluline.

Staatiline koormus

Elektrivõrgu koormust vaadeldakse arvutustes suurte koormussõlmede kaupa. Eristatakse koormuse staatilisi ja dünaamilisi mudeleid. Staatilistes mudelites kirjeldatakse aktiivkoormuse P ja reaktiivkoormuse Q sõltuvust sõlmepingest ja sagedusest algebraliste, eksponentsiaalsete või polünoomsete funktsioonidega

$$P = P_0(u)^a (1 + K_{pf} \Delta f) \quad (5.95)$$

$$Q = Q_0(u)^b (1 + K_{qf} \Delta f) \quad (5.96)$$

või

$$P = P_0(p_1 u^2 + p_2 u + p_3)(1 + K_{pf} \Delta f) \quad (5.97)$$

$$Q = Q_0(q_1 u^2 + q_2 u + q_3)(1 + K_{qf} \Delta f) \quad (5.98)$$

Siin $u = U/U_0$ on pinge suhteline väärtus lähtetalitluses. Eksponentsiaalse mudeli korral parameetrite a ja b väärtused 0, 1 ja 2 vastavad konstantse võimsusega, vooluga või takistusega

koormustele. Need parameetrid väljendavad sisuliselt koormuse pingetundlikkust dP / dU või dQ / dU , kui $U = U_0$. Ekvivalentsele koormusele $a = 0,5 \dots 1,8$ ja $b = 1,5 \dots 6,0$. Parameeter b on seejuures ebalineaarne trafode ja mootorite küllastumise tõttu. Täpsemate andmete puudumisel võib võtta $a = 1$ ja $b = 2$. Polünoomse mudeli komponendid väljendavad vastavalt konstantse takistuse, voolu ja võimsuse osakaalu koormuses. Seetõttu nimetatakse seda mudelit ka ZIP-mudeliks. Tegurite väärtused on vahemikus $K_{pf} = 0 \dots 3,0$ ja $K_{qf} = 2,0 \dots 0$. Kuna stabiilsuse analüüsil ei kuulu sagedus olekuparameetrite hulka, leitakse selle väärtus pinge nurksageduse kaudu. Koormuse universaalne mudel saadakse polünoomse ja eksponentsiaalse mudeli ühildamise teel järgmiselt:

$$P = P_0 (P_{ZIP} + P_{EX1} + P_{EX2}) \quad (5.99)$$

kus

$$P_{ZIP} = p_1 u^2 + p_2 u + p_3 \quad (5.100)$$

$$P_{EX1} = p_4 u^{a1} (1 + K_{pf1} \Delta f) \quad (5.101)$$

$$P_{EX2} = p_5 u^{a2} (1 + K_{pf2} \Delta f) \quad (5.102)$$

Samal viisil esitatakse ka reaktiivvõimsuse mudel. Madalate pingete korral ei ole vaadeldud mudel adekvaatne. Võivad tekkida ka arvutuslikud probleemid võrguvõrrandite lahendamisel. Seetõttu kasutatakse madalate pingete korral konstantse takistusega mudelit.

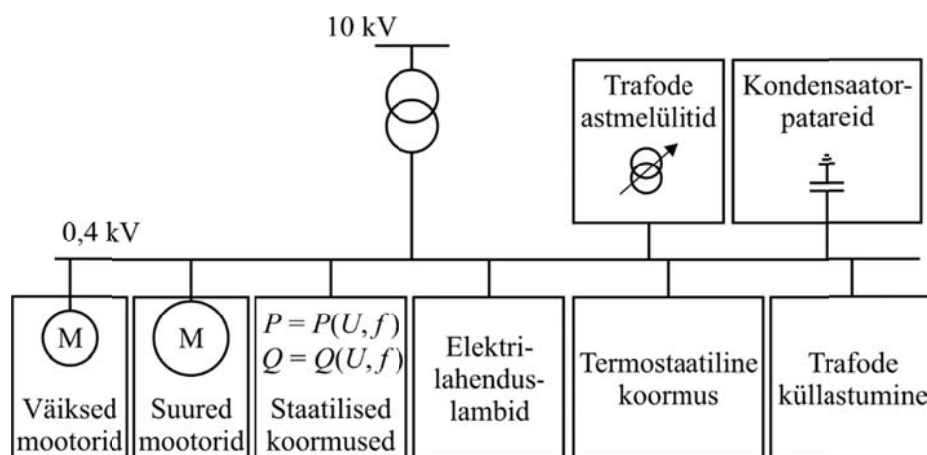
Elektrivõrgu koormus muutub oluliselt ajas, sõltub ilmastikust ja talitusparameetritest ning on stohhastilise iseloomuga. Esitatud mudel väljendab koormuse sõltuvust talitusparameetritest, pingest ja sagedusest. Selle mudeli parameetrid, eriti P_0 ja Q_0 on aga muutuvad muude koormust mõjutavate tegurite tõttu. Koormuse taset, mida parameetrid P_0 ja Q_0 väljendavad, hinnatakse üldiselt koormuse prognoosi meetoditega. Sel teel saab koormust hinnata siiski vaid lühikest aega, mõneks päevaks ette elektrivõrgu kohta summaarselt või suuremate regioonide kaupa. Elektrivõrgu sõlmekoormuste vajaliku täpsusega prognoosi enamasti teha ei õnnestu, kuna formaalsed prognoosimeetodid esitavad suuri nõudeid koormusandmete mahule ja kvaliteedile.

Dünaamiline koormus

Koormuse siirdeprotsessid sumbuvad pinge ja sageduse mõõdukatel muutustel enamasti küllaltki kiiresti, mistõttu staatiline mudel on vastuvõetav. Elektrisüsteemi kesk- ja pikaajaliste siirdeprotsesside korral, mida vaadeldakse pingestabiilsuse ja regioonidevahelise võnkumise käsitlemisel, tuleb siiski arvestada ka koormuse dünaamikat. Olulisel kohal on asünkroon-

mootorite dünaamika tundmine ning täiendavalt tuleb tähelepanu pöörata järgmistele seadmetele (joonis 5.13):

- Elektrilahenduslambid kustuvad, kui pinge langeb alla 0,7...0,8 suhtelistes ühikutes ning sütivad pingetõustes 1...2-sekundilise viitega.
- Elektrimootoreid käivitavad kontaktorid lülituvad välja pingel 0,5...0,8, külmutid ja kliimaseadmete väikesed mootorid lülitatakse välja termilise ülekoormuskaitse poolt 10...30 sekundi möödudes.
- Termostaatiline koormus (ruumide küte ja jahutus, veeboilerid, külmutid ja kliimaseadmed) toimib madalama pingel korral kauem, mistõttu vool elektrivõrgus tõuseb.
- Pingelangemisel vool trafodes väheneb, mistõttu väheneb ka nende küllastatus ning reaktiivvõimsuse tarve tõuseb.
- Pinget reguleerivate trafode astmelülitid ja juhivad kondensaatorpatareid reageerivad pingelangusele umbes 1 minuti jooksul, püüdes pinget taastada 2...3 minuti pärast.



Joonis 5.13. Staatilised ja dünaamilised koormused.

Elektrivõrgu koormuse estimeerimine

Elektrivõrgu sõlmekoormus moodustub suure arvu tarbijate aktiiv- ja reaktiivvõimsustest. Sõlmekoormuste ekvivalentsete karakteristikute hindamisel on kasutusel mõõtmisepõhine ja komponendipõhine lähenemisviis. Staatilise aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkuse võib mõõtmiste alusel leida, kui muuta koormuse pinget näiteks toitetrafode astmelülititega. Sagedust seevastu saab muuta vaid isoleeritud süsteemides. Ühendüsteemides hinnatakse koormuse sagedustundlikkust kaudselt. Katsete alusel saab hinnata ka väikestele talitlushäiringutele vastavaid karakteristikuid. Katseid pole mõeldav teha koormuse dünaamiliste omaduste väljaselgitamiseks suurte häiringute korral. Lähtuda tuleb tegelikust olukorrast.

Komponendipõhise lähenemisviisi korral jaotatakse koormused esmalt klassideks, nt kommunaal-, kommerts-, tööstus-, põllumajanduskoormus jm. Seejärel vaadeldakse koormuse komponente elektriseadmete kaupa. Kommunaalkoormuse puhul võib vaadelda kütteseadmeid, veeboilereid, kliimaseadmeid, valgustust, külmkappe jm. Käsiraamatutest leiab eri seadmete tüüpilised näitajad ning olles hinnanud seadmetüüpide osakaalu, saab arvutada koormusklassikohased parameetrid. Tabelis 5.2 on näiteid koormuskomponentide parameetritest. Kui selline hindamine tundub olevat liiga üksikasjalik, võib piirduda ka koormusklasside keskmiselt omaste näitajatega (tabel 5.3).

Tabel 5.2. Koormuskomponentide staatilised karakteristikud.

Komponent	Võimsustegur	$\partial P / \partial U$	$\partial Q / \partial U$	$\partial P / \partial f$	$\partial Q / \partial f$
Kliimaseade	0,90	0,09	2,5	0,98	-1,3
Veeboiler	1,00	2,00	0	0	0
Pesumasin	0,65	0,08	1,6	3,00	1,8
Külmkapp	0,80	0,77	2,5	0,53	-1,5
Televiisor	0,80	2,00	5,1	0	-4,5
Luminofoorlamp	0,90	0,96	7,4	1,00	-2,8
Tööstuslik mootor	0,88	0,07	0,5	2,50	1,2
Veepump	0,85	1,40	1,4	5,00	4,0
Trafo (tühijooksul)	0,64	3,40	11,5	0	-11,8

Tabel 5.3. Koormusklasside staatilised karakteristikud.

Koormusklass	Võimsustegur	$\partial P / \partial U$	$\partial Q / \partial U$	$\partial P / \partial f$	$\partial Q / \partial f$
Kommunaalkoormus:					
suvi	0,90	1,20	2,9	0,8	-2,2
talv	0,99	1,50	3,2	1,0	-1,5
Kommertskoormus:					
suvi	0,85	0,99	3,5	1,2	-1,6
talv	0,90	1,30	3,1	1,5	-1,1
Tööstuskoormus	0,85	0,18	6,0	2,6	1,6
Elektrijaama omatarve	0,80	0,10	1,6	2,9	1,8

5.3 Regulaatorid

Elektrisüsteemi talitlust mõjutavad ennekõike sünkroongeneraatorite ergutusregulaatorid ja turbiinide kiirusregulaatorid.

5.3.1 Ergutussüsteemid

Sünkroongeneraatori ergutussüsteemi peamiseks ülesandeks on toita alalisvooluga rootoril paiknevat ergutusmähist. Lisaks täidab ergutussüsteem juhtimis- ja kaitsefunktsioone. Siia

kuuluvad pinge ja reaktiivvõimsusvoo juhtimine ning elektrisüsteemi stabiilsuse tõstmine. Kaitsefunktsioonid tagavad, et sünkroongeneraatori talitlemisel ei ületata generaatori talitlusparameetrite lubatud väärtusi.

Nõudeid ergutussüsteemile võib vaadelda nii generaatori kui elektrisüsteemi seisukohalt. Generaatoris peab ergutussüsteem tagama ergutusmähise pideva toite nii normaal- kui avariitalitluses. Seejuures tuleb vältida kõrge ergutuspingest tingitud mähiste isolatsiooni riknemist ning staatori ja rootori ülekuumenemist. Lühiajaliselt (15...60 s) võib generaatorit ka ülekoormata. Elektrisüsteemi seisukohalt on oluline, et ergutussüsteem peab efektiivselt tagama pinge reguleerimise ning aitama kaasa elektrisüsteemi stabiilsuse säilitamisele. Ergutussüsteem peaks kiiresti reageerima talitlushäiringutele ning summutama võnkumisi süsteemis.

Ergutussüsteemi ehitus

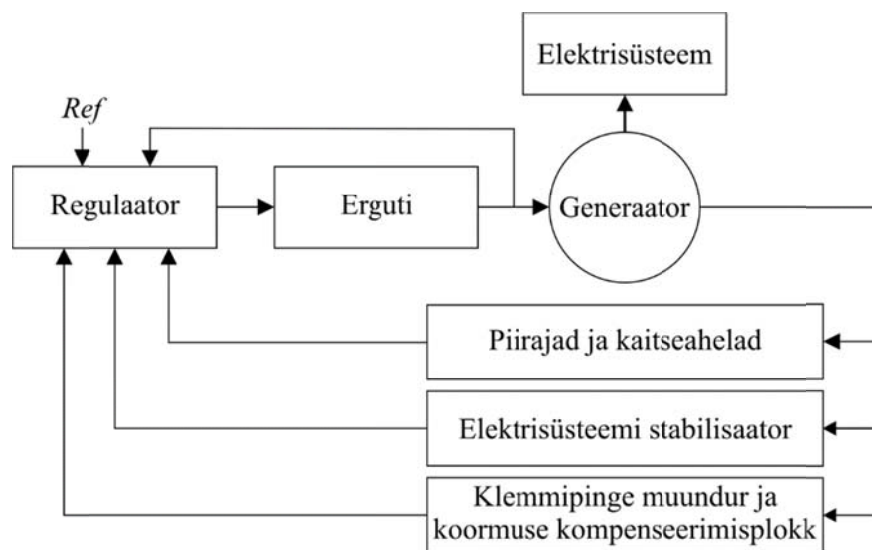
Sünkroongeneraatori ergutussüsteemi põhimõtteskeem on joonisel 5.14. Siin on erguti ülesandeks ergutusmähise varustamine sobiva alalisvooluga. Regulaatoris toimub juhtimissignaalide töötlemine ja võimendamine erguti toitmiseks sobivale tasemele. Generaatori klemmipinge muunduri ja koormuse kompenseerimisploki eesmärk on generaatori väljundpinge mõõtmine, alaldamine ning võrdlemine generaatori klemmipinge soovitud väärtusega. Juhul kui soovitakse reguleerida pinget mõnes võrgu kaugemas punktis (nt plokitrafo ülempingepool), on selleks ette nähtud koormuse kompensaator. Elektrisüsteemi stabilisaator väljastab täiendava signaali generaatori võnkeprotsesside summutamiseks. Piirajate ja kaitseahelate eesmärk on vältida generaatori ja ergutussüsteemi tehniliste piiride ületamist. Levinumateks funktsioonideks on ergutusmähise voolu, suurima ergutuse ja generaatori klemmipinge piiramine.

Toimimis põhimõttelt jagunevad ergutussüsteemid alalis- ja vahelduvvoolumasinatele põhinevateks ning staatilisteks. Esimesel juhul kasutatakse ergutusvoolu saamiseks alalisvoolugeneraatorit ning vool juhitakse sünkroongeneraatori ergutusmähisesse harjade ja kontaktrõngaste kaudu. Ergutusgeneraator käitatakse mootoriga või see asub generaatoriga samal võllil. Nüüdisajal kasutatakse alalisvooluerguteid vaid kuni 100 MW turbogeneraatoritel ning teistes ergutussüsteemides reservergutuseallikana. Kuna sellised ergutussüsteemid on paljudes vanemates elektrijaamades, säilib nende osatähtsus veel aastateks.

Teiseks võimaluseks on kasutada ergutusvoolu saamiseks vahelduvvoolugeneraatorit ning statsionaarseid või pöörlevaid alaldeid. Tavaliselt on selline ergutusgeneraator samal võllil põhigeneraatoriga. Alaldid võivad olla juhitavad või mittejuhitavad. Juhitavad alaldid tagavad

tunduvalt suurema ergutuse kasvukiiruse ja lae. Ka puudub pöörlevate alaldite korral vajadus kontaktrõngaste ja harjade järele. Siit ka nimetus – harjadeta ergutussüsteem (*brushless excitation system*). Harjadeta ergutussüsteeme kasutatakse nüüdisajal üle 300 MW turbogeneraatoritel. Ergutusvool võib olla suur, näiteks 1200 MW generaatoritel kuni 7,5 kA.

Nüüdisajal kasutatakse enamasti staatilisi ergutussüsteeme, millel puuduvad pöörlevad osad. Nendes juhitakse vahetraafode ja alaldite tekitatud alalisvool ergutusmähisesse harjade ja kontaktrõngaste kaudu. Ergutussüsteemi toide võetakse välisvõrgust või otse generaatori klemmidelt.



Joonis 5.14. Sünkroongeneraatori ergutussüsteemi põhimõtteskeem.

Toite seisukohalt jagatakse ergutussüsteemid sõltumatuteks ja sõltuvateks. Sõltumatu ergutussüsteemi korral paikneb ergutust toitev generaator turboagregaadi võllil. Sel juhul ei ole ergutus seotud elektrisüsteemiga ja selle talitusparameetritega. Ergutiks on alalisvoolugeneraator või vahelduvvoolugeneraator koos alaldiga. Sõltuva ergutussüsteemi korral toimib ergutajana mootoriga käitav alalisvoolugeneraator või alaldi, mida toidetakse generaatori klemmidelt või elektrivõrgust.

Ergutussüsteemi käidu üheks probleemiks on ergutusmähise magnetvälja kustutamine generaatori väljalülitamisel. Suure induktiivsuse tõttu tekivad mähise lihtsal väljalülitamisel lubamatult kõrged pinged. Ka peab väljakustutusaeg olema staatoriahela seisukohalt võimalikult lühike. Ajalooliselt oli esimeseks meetodiks ergutusmähise ümberlülitamine väljakustutustakistusele. Välja kustutusaeg oli sel meetodil 6...8 sekundit, mis aga ei ole tänapäeva võimsate generaatorite puhul piisav. Nüüdisajal on kasutusel väljakustutusautomaadid, kus elektrikaar surutakse kustutusvõresse, mis hakib selle paljudeks minielektrikaarteks. Nii saavutatakse

väljakustutusajaks 0,5...1,0 sekundit. Juhitavate alalditega ergutussüsteemides lülitatakse välja kustutamiseks alaldid ümber invertertalitusse, mille tõttu ergutusmähises salvestatud energia suunatakse ergutile või trafole. Väljakustutusaeg on sel juhul väga lühike.

Ergutussüsteemi mõju elektrisüsteemi stabiilsuse tõstmisele hinnatakse lagiergutuspinge ja -voolu ning ergutuspinge muutumiskiiruse järgi. Lagiergutuspinge ja -vool on suurimad alalispinge ja -voolu väärtused, mida ergutussüsteem on võimeline teatud tingimustes andma. Kõrgem lagiergutuspinge parandab dünaamilist stabiilsust. Ergutussüsteemi hindamiseks elektrisüsteemi talitlushäiringute ajal kasutatakse juhtimisteooriast tuntud näitajaid ja meetodeid. Levinumateks näitajateks on ergutussüsteemi reageerimiskiirus ja sageduskarakteristik. Reageerimiskiirust iseloomustavad ergutuspinge tõusu kiirus, ülereguleerimine ja kujunemisaeg. Sageduskarakteristikute juures vaadeldakse madalsageduslikku võimendustegurit, löikesagedust ning faasi- ja võimendusvaru.

Turbogeneraatorite ergutussüsteemide toide on enamasti sõltumatu. Hüdrogeneraatorite korral kasutatakse alalisvoolugeneraatoril baseeruvat sõltumatut ergutussüsteemi kuni võimsusteni 170 MW. Nüüdisajal minnakse hüdrogeneraatorite juures üle sõltuvatele ergutussüsteemidele, mis on varustatud juhitavate pooljuhtalalditega, mis tagavad tunduvalt suurema ergutuse kasvukiiruse ja lae. Tarbimiskeskustest kaugel töötavad suure võimsusega hüdrogeneraatoritel on põhiliselt sõltumatud ergutussüsteemid, kus ergutiks on 50 Hz vahelduvvoolugeneraator ja juhitav alaldi.

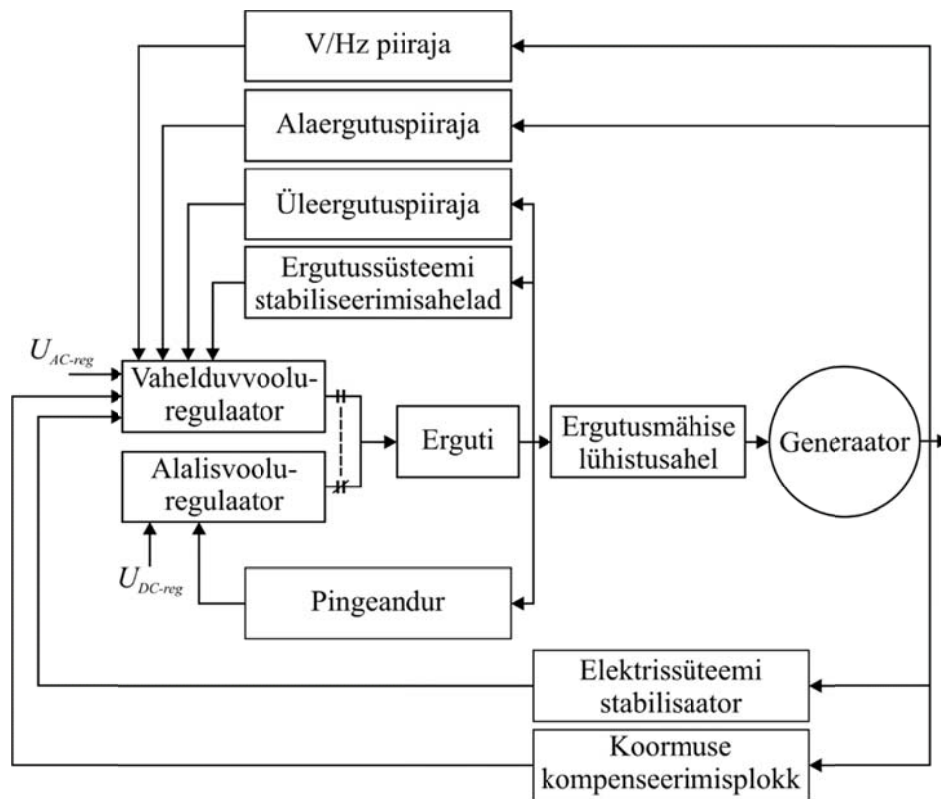
Juhtimis- ja kaitsefunktsioonid

Tänapäeva ergutussüsteemid täidavad pinge reguleerimise kõrval veel mitmesuguseid juhtimis- ja kaitsefunktsioone (joonis 5.15).

Vahelduvvooluregulaatori ülesanne on hoida generaatori klemmipinge soovitud vahemikus. Selle komponendi kaudu toimivad ka mitmed teised juhtimis- ja kaitsefunktsioonid. Alalisvooluregulaator hoiab ergutusmähise pinget konstantsena. Selle kaudu juhitakse ergutust manuaalselt, mida kasutatakse peamiselt generaatori katsetamisel ja käivitamisel.

Ergutussüsteemi stabiliseerimisahelate ülesanne on ergutussüsteemi dünaamika parandamine eriti generaatori tühijooksul, kui ühendus võrguga puudub. Probleem on tingitud sellest, et alalis- ja vahelduvvooluergutite korral võivad tekkida ajalised viited. Stabiliseeriv toime saavutatakse tagasisideahelatega, mis minimeerivad faasinihkeid konkreetses sagedusvahemikus. Staatiliste ergutussüsteemide korral kompenseerimisahelaid ei vajata.

Elektrisüsteemi stabilisaator aitab summutada süsteemis esinevaid võnkumisi, eriti neid, mis seonduvad staatilise stabiilsusega. Stabilisaatori sisendsignaalideks võivad olla agregadi pöörlemiskiirus, võrgusagedus ja aktiivvõimsus.



Joonis 5.15. Ergutussüsteemi juhtimis- ja kaitsefunktsioonid.

Koormuse kompenseerimisplakk võimaldab pingeregulermist mõnes muus punktis, mitte tingimata generaatori klemmidel. Generaatori klemmide ja reguleerimispunkti vahelist impedantsi arvestatakse muudetavate aktiiv- ja reaktiivtakistustega R_C ja X_C , mis lisavad generaatori klemmipingele voolust sõltuva komponendi. Pingeregulaatorisse edastatav kompenseeritava pingeväärtus on siis

$$U_C = |\underline{U}_G + (R_C + jX_C)\underline{I}_G| \quad (5.103)$$

Koormuse kompenseerimist võib kasutada kahel eesmärgil. Juhul kui samadele lattidele on ühendatud mitu generaatorit, võib kompenseerimise abil jaotada reaktiivvõimsust generaatorite vahel ühtlasemalt. Sel juhul asub reguleeritav punkt generaatori sees ning takistuste R_C ja X_C väärtused on positiivsed. Kui pinget tahetakse reguleerida mõnes generaatorist kaugemas punktis (nt plokitrafo kõrgepingepool), siis on takistuste R_C ja X_C väärtused negatiivsed.

Alaergutuspiiraja (*underexcitation limiter*) ülesandeks on takistada ergutuse langemist tasemele, mis põhjustaks staatilise stabiilsuse kao või ankru laupühenduste kuumenemise. Alaer-

gutuspiiraja juhtimissignaali saadakse kas generaatori pingest ja voolu või aktiiv- ja reaktiivvõimsuse kombinatsioonist. Üleergutuspiiraja (*overexcitation limiter*) peab kaitsma generaatorit ülekuumenemise eest. Ergutusmähise liigvoolu avastamisel edastatakse pärast mõningat viidet vahelduvvooluregulaatorile signaal ergutuse vähendamiseks. Juhul kui see pole edukas, annab üleergutuspiiraja signaali vahelduvvooluregulaatori väljalülitamiseks ning juhtimine suunatakse üle alalisvooluregulaatorile, mis peaks viima ergutusvoolu nimiväärtuseni. Kui ka see ei anna tulemust, siis annab piiraja signaali generaatori väljalülitamiseks.

V/Hz piiraja kaitseb generaatorit ja plokitrafot madalast sagedusest või ülepingest põhjustatud liigse magnetvoo eest. Suurenenud magnetvoo väärtus võib põhjustada ülekuumenemist ning kahjustada plokitrafo ja generaatori südamikke. Kui sagedus või pinge ületab lubatud väärtusi, piiratakse generaatori väljundpinget. Kui piiramine ei anna vajalikke tulemusi, lülitatakse generaator teatud viitega välja.

Ergutusmähise lühistusahel kaitseb ergutusmähist ülepingete eest. Suured ülepinged võivad tekkida pooluste libisemise ja lühiste ajal, mil ergutusmähises indutseeritud vool võib olla negatiivne. Probleem esineb vahelduvvoolu ja staatiliste ergutussüsteemide korral, kus erguti vool ei saa olla negatiivne. Vältimaks ergutusmähises suuri pingeid kasutatakse ergutusmähisega rööpset möödaviikahelat, mis koosneb türistorist ja takistist või varistorist.

Ergutussüsteemi modelleerimine

Ergutussüsteemi modelleerimisviis sõltub sellest, milliseid nähtusi uurida soovitakse. Näiteks staatilisele ja dünaamilisele stabiilsusele avaldavad mõju pingeregulaator, elektrisüsteemi stabilisaator ja ergutussüsteemi stabiliseerimisahelad. Piirajate ja kaitseahelate modelleerimine osutub tarvilikuks, kui vaadeldakse kesk- ja pikaajalist stabiilsust.

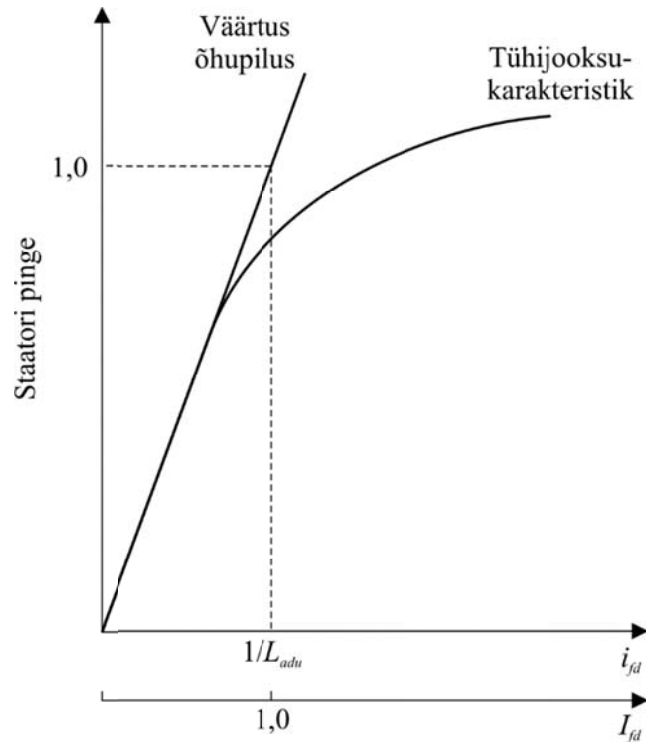
Parema ülevaatlikkuse saamiseks esitatakse suurused suhtelistes ühikutes. Suhteliste ühikute süsteemi moodustamiseks on mitu võimalust. Levinuim on moodus, kus erguti väljundpinge suhtelistes ühikutes 1,0 on võrdne ergutuspingega, mis on vajalik tekitamiseks sünkroonmasina ankru nimiklemmipinget, ning väljundvool suhtelistes ühikutes 1,0 on võrdne sellele vastava ergutusmähise vooluga. Ergutussüsteemi sisendsignaalideks on sünkroonmasina staatorisuurused ja rootori pöörlemiskiirus. Nendele suurustele kasutatakse sama suhteliste ühikute süsteemi mis sünkroonmasina modelleerimisel. Üleminekut ühelt süsteemilt teisele on vaja vaid ergutusmähisega seotud suuruste korral.

Tühijooksul, kui $i_d = i_q = 0$, on staatoris nimipinge tekitamiseks vajalik ergutusvool i_{fd} (joonis 5.16). Suhtelistes ühikutes

$$U_G = u_q = L_{adu} i_{fd} = 1,0, \quad i_{fd} = \frac{1}{L_{adu}} \quad (5.104)$$

ning ergutuspinge on

$$u_{fd} = R_{fd} i_{fd} = \frac{R_{fd}}{L_{adu}} \quad (5.105)$$



Joonis 5.16. Sünkroonmasina tühijooksukarakteristikud.

Kuna definitsiooni kohaselt on erguti väljundvoolu I_{fd} väärtus suhtelistes ühikutes võrdne ühega, siis

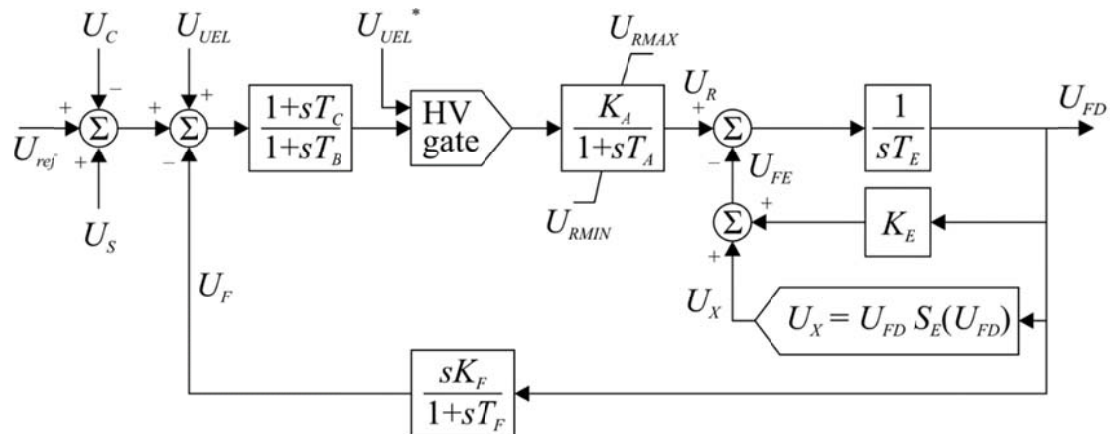
$$I_{fd} = L_{adu} i_{fd} \quad (5.106)$$

ja erguti väljundpinge

$$U_{fd} = \frac{L_{adu}}{R_{fd}} u_{fd} \quad (5.107)$$

Nimiühikutes on erguti väljundpinge ja -vool muidugi võrdsed generaatori ergutuspinge ja -vooluga. Mittevõrdsus esineb erineva suhteliste ühikute süsteemi rakendamise tõttu. Püsitalitluses on suurused U_{fd} ja I_{fd} suhtelistes ühikutes võrdsed. Häiringule vastavas talitluses aga mitte, kusjuures U_{fd} on määratletud ergutussüsteemi ja I_{fd} ergutusahelate dünaamikaga.

Ergutussüsteemi modelleerimiseks tuleb esmalt vaadelda süsteemi komponente, nagu alalis- ja vahelduvvoolu ergutid, alaldid (juhitavad või mittejuhitavad), stabiliseerivad ahelad ning signaalide mõõtmise ja töötlemise ahelad. Süsteemi komponentide talitlemist on üksikasjalikult kirjeldada küllaltki töömahukas. Põhiseoste kõrval tuleb arvesse võtta komponentide konstruktsioonide erinevusi, hilistumistest tingitud ajakonstante, magnetahelate küllastumist, kommutatsiooniprotsesse alaldites jm. Muidugi tuleb neid asjaolusid vaadelda nii ergutus- kui elektrisüsteemi erinevatel talitlustel, alates tühijooksust ja lõpetades lühisetalitlusega.



Joonis 5.17. DC1A tüüpi ergutussüsteemi mudel.

Vaadeldud komponentidest võib koostada erineva struktuuriga ergutussüsteeme. IEEE on jaotanud ergutussüsteemide mudelid 19 tüüpi, nii nagu neid tuleks kasutada elektrisüsteemi stabiilsuse käsitlemisel [3]. Vaatleme neist lihtsaimat alalisvoolu ergutussüsteemi, mille täheks on DC1A (joonis 5.17). Regulaatorina võib siin olla reostaat, pöörlev või magnetiline võimendi. Ergutussüsteemi sisendiks on generaatori klemmipinge anduri ja koormuse kompenseerimisploki väljund U_C . Summeerimissõlmes lahutatakse U_C väärtus etteantud seadesuure väärtusest U_{ref} . Sellest lahutatakse veel stabiliseerivate ahelate tagasiside väärtus U_F ning liidetakse elektrisüsteemi stabilisaatori väljundi väärtus U_S . Normaaltalitluses on viimase kahe signaali väärtus null. Saadud signaal võimendatakse regulaatoris, mille võimendustegur on K_A . Regulaatoriga seonduvad ajakonstant T_A ja ergutuspinge piirid. Pingeregulaatoriga seotud ekvivalentseid ajakonstante saab modelleerida vastavate ajakonstantidega T_B ja T_C . Kasutusel on ka alaergutuspiiraja signaal U_{UEL} , mis toimib ekstreemsetes oludes.

Plokkskeemi parem pool kujutab ergutit. Erguti sisendiks on pingeregulaatori väljundsignaal U_R . Ergutussüsteem võib olla nii sõltumatu kui ka sõltuv. Sõltumatu ergutussüsteemi korral väljendab tegur K_E ergutusreostaadi väärtust. Reostaadi väärtust püütakse reguleerida nii, et pingeregulaatori väljund U_R oleks keskmiselt null. Sõltuva ergutussüsteemi korral on teguri

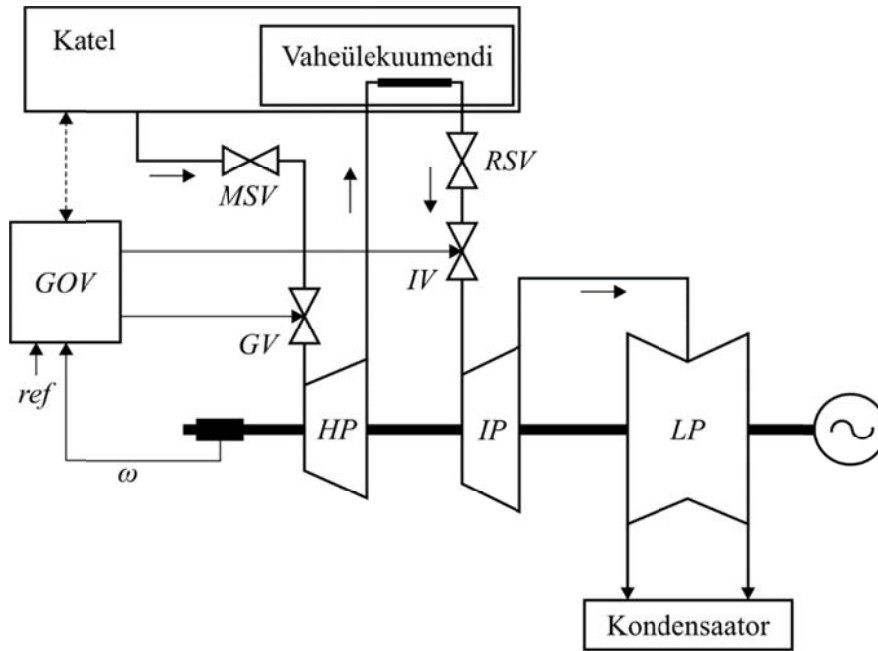
K_E väärtus üldjuhul 1. Komponent $S_E(U_{FD})$ arvestab küllastuse mõju. Küllastusploki väljund U_X on sisendi U_{FD} ja mittelineaarse funktsiooni $S_E(U_{FD})$ korrutise väärtus konkreetse ergutuspinge juures. Võimendustegur K_F ja ajakonstant T_F väljendavad ergutussüsteemi stabiliseerivate ahelate toimet.

5.3.2 Turbiinide kiirusregulaatorid

Auruturbiinid on soojuselektrijaamade tähtsamad komponendid, mille vahendusel toimub turbiini siseneva auru liikumise kineetilise energia muundamine mehaaniliseks energiaks, mis omakorda muundatakse turbiiniga samal võllil olevas generaatoris elektrienergiaks. Auruturbiine kasutatakse nii kondensatsioonielektrijaamades, tuumajaamades kui koostootmisjaamades. Turbiinide konstruktsioon sõltub jaama tüübist, võimsusest ja auru parameetritest. Tavaliselt on turbiinid mitmeastmelised, koosnedes kõrgrõhu-, keskrõhu- ja madalrõhuastmest. Turbiinide juhtimise seisukohalt on oluline ka trumli, vaheülekuumendite ning klappide ja ventiilide olemasolu ja paiknemine.

Joonisel 5.18 on auruturbiini konfiguratsioon. Turbiin koosneb kõrgrõhu-, keskrõhu- ja madalrõhuastmest (*HP*, *IP* ja *LP*). Skeemi kuulub veel vaheülekuumendi. Aur siseneb turbiini läbi turbiini juhtklapi (*governor control valve, GV*), mida juhib reguleerimissüsteem (*govering system, GOV*). Kõrgrõhuastmes töö teinud aur suunatakse vaheülekuumendisse ja liigub siis läbi sulgeklapi (*intercept valve, IV*) keskrõhuastmesse ning sealt edasi madalrõhuastmesse. Turbiini juhtklapp reguleerib turbiini siseneva auru hulka ning juhib seeläbi turbiini võimsust ja süsteemi sagedust. Sulgeklapi (*RSV*) ülesanne on turbiini võimsuse kiire vähendamine liigikiiruse korral. Kuna kesk- ja madalrõhuaste annavad turbiini väljundvõimsusest ligemale 70%, siis on see küllaltki tõhus meetod turbiini kiiruse avariiliseks juhtimiseks. Skeemis on veel sulgeventiil (*MSV*) turbiini käitamiseks ja peatamiseks. Süsteemi kuulub torusid, kuhu on salvestatud küllaltki suur kogus auru, mille mõju tuleb modelleerimisel arvestada.

Auruturbiini plokskeem on joonisel 5.19. Auru hulk muutub juhtventiilide avanemisel aurujaotuskarbi ja torustiku inertsi tõttu viitega, mille ajakonstant T_{CH} on 0,2...0,3 sekundit. Auru liikumist kesk- ja madalrõhuastmes aeglustab vaheülekuumendi ajakonstandiga T_{RH} suurusjärgus 5...10 sekundit. Auru liikumine madalrõhuastmesse läbi torustike lisab täiendava ajakonstandi T_{CO} ligikaudse väärtusega 0,5 sekundit. Võib tähele panna, et vaheülekuumendi põhjustab suurte auruhulkade tõttu eriti märgatavaid viiteid.



Joonis 5.18. Auruturbiini konfiguratsioon.

Turbiini kirjeldamisel kasutatakse suhteliste ühikute süsteemi, kus baasvõimsus on võrdne turbiini suurima võimsusega nimiaururõhul tingimusel, et juhtklapp on täielikult avatud. Sel juhul on juhtventiili asend suhtelistes ühikutes $V_{CV} = 1,0$. Turbiiniastmete võimsuste summa $P_{HP} + P_{IP} + P_{LP}$ on siis suhtelistes ühikutes 1,0. Turbiini mehaaniline võimsus suhtelistes ühikutes avaldub momendi M_m kaudu, kui

$$P_m = \frac{\omega_B}{P_B} M_m \quad (5.108)$$

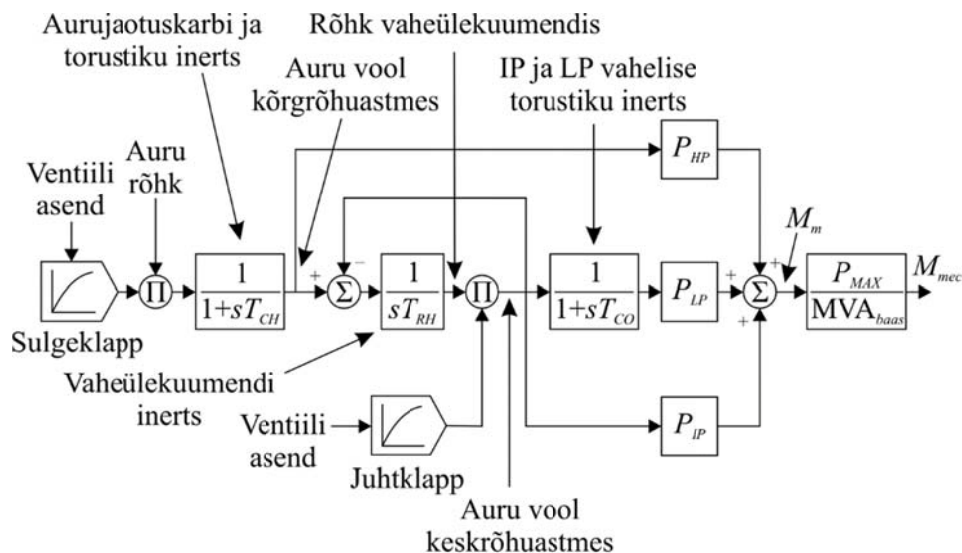
ning võrdub turbiini momendiga suhtelistes ühikutes. Turbiini ülekandefunktsioon avaldub siis plokskeemi kohaselt kujul

$$\frac{\Delta M_m}{\Delta V_{CV}} = \frac{P_{HP}}{1 + sT_{CH}} + \frac{1 - P_{HP}}{(1 + sT_{CH})(1 + sT_{RH})} = \frac{1 + sP_{HP}M_{RH}}{(1 + sT_{CH})(1 + sT_{RH})} \quad (5.109)$$

Siin on eeldatud, et ajakonstant T_{CO} võrreldes ajakonstandiga T_{RH} on tühine ning juhtventiili karakteristik on lineaarne.

Turbiine juhitakse regulaatorite abil, millel on kolm põhifunktsiooni: tavalise kiiruse ja koormuse juhtimine, ülekiiruse juhtimine ja turbiini väljalülitamine liigkiiruse korral. Viimased kaks on eriti omased auruturbiinidele liigsest kiirusest tingitud avariide vältimiseks. Regulaatoritel võib olla veel teisigi funktsioone, näiteks turbiini käivitamine või seiskamine, reageerimine kiiruse või koormuse järsule muutusele jm.

Kiiruse ja koormuse reguleerimisel on kasutusel statism, et jaotada koormus sobivalt agregaatide vahel. Tavaliselt on statismi väärtuseks 4...5% etteantud sättesuurusest. Auruturbiini reguleeritakse juhtklapi abil, mis muudab turbiini minevat auru hulka.



Joonis 5.19. Auruturbiini plokk skeem.

Ülekiiruse juhtimisega vähendatakse turbiini kiirust pärast elektrilise koormuse järsku vähenemist ning taastatakse olukord, kus turbiin on suuteline uuesti koormust lisama. Eesmärgiks on hoida turbiini kiirus alla turbiini väljalülitumise piiri, mis on tavaliselt 110...115% turbiini nimikiirusest. Vaheülekuumenditega turbiine juhitakse nii juht- kui sulgeklappide kaudu, sest tingituna vaheülekuumendite suurest aurumahutavusest ja inertsist ei suuda juhtklapid üksi vajalikul määral auru vähendada. Liigikiirusest tingitud väljalülitumine on reservkaitse, mis peab rakenduma, kui ülekiiruse juhtimisega ei ole suudetud turbiini kiirust vajalikule tasemele viia. Lisaks turbiini juht- ja sulgeklappide sulgemisele antakse signaal ka aurugeneraatori väljalülitamiseks.

Aastate jooksul on turbiinide reguleerimissüsteemid edasi arenenud. Vanemad regulaatorid põhinesid mehaanilis-hüdraulilisel tehnikal. 1960. ilmusid elektrohüdraulilised kiirusregulaatorid. Nüüdisajal on kasutusel ka digitaal-elektrohüdraulilised regulaatorid.

Täpsemalt on erinevate agregaatide ja regulaatorite modelleerimise kohta võimalik lugeda kirjandusest [1]-[10]. Eelnevalt on esitatud peamised seosed elektrisüsteemi elementide dünaamikas eesmärgiga kirjeldada peamisi seoseid ning võimalikke mõjusid elementide vahel.

5.4 Võrguarvutustarkvarade standardised mudelid

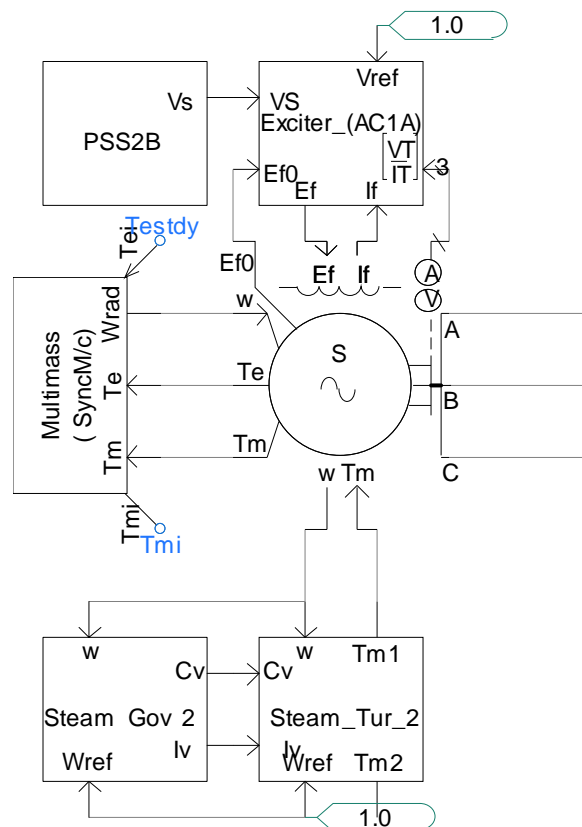
Ülekandevõrgu talitluse arvutamiseks kasutatakse mitmesuguseid tarkvarasid. Eestis on peamiselt kasutusel tarkvarad PSS/E ja PSCAD. Esimene neist on peamiselt mõeldud suurte süsteemide võimsusvoogude ja stabiilsuse ning teine elektromagnetiliste siirdeprotsesside arvutamiseks.

Elektrisüsteemi elementide modelleerimiseks kasutatakse üldjuhul standardseid mudeleid, mis baseeruvad vastavatel IEEE poolt kokku lepitud põhimõtetel [3]. Esitatud põhimõtete baasil on koostatud vastavaid standardeid ning mitmeid juhendmaterjale. Eelduseks siinkohal on olnud see, et mistahes tootja seadmeid on võimalik modelleerida teatud tüüpi mudelitega ja seeläbi vältida juhtumit, kus täpset mudelit seadme kohta oskavad koostada ainult tootjad ise. Selline avatud lähenemine on suhteliselt levinud sünkroongeneraatorite tootjate juures samas nt tuulikute tootjate juures ei ole veel senimaani jõutud ja enamjaolt on kasutusel konkreetse tuulikutootja mudelid. Tehtud on küll edusamme standardiseeritud mudelite koostamisel, kuid eeldatavalt kulub veel aastaid enne kui olemas on sellised mudelid, mis sobilikul kujul kujutavad tootmiseseadet.

Elektrisüsteemi dünaamikaprotsesside modelleerimise juures on oluline sünkroonmasinate modelleerimisel. Kuna sünkroonmasinate teooria ja lahendused on suhteliselt muutumatuna püsinud aastakümneid, siis nende modelleerimine ei ole probleemiks. Kasutusel on standardised mudelit, mis iseloomustavad välje- ja peitpoolustega generaatoreid. Modelleerimise juures on üldjuhul küsimus, et kui täpset mudelit on tarvis kasutada, kas standardset või nt 6 järku mudelit. Vastavalt sellele tuleb ka sisestada vajalike parameetrite väärtused. Sünkroongeneraatorite modelleerimiseks on PSCAD tarkvaras kasutusel üks standardne mudel, mis tuleb vastavate parameetrite valiku ja sisestamisega seadistada vastavaks reaalsele generaatorile. PSS/E tarkvaras on peit- ja väljepoolustega generaatoritele koostatud eraldi standardset mudelid ning samuti eristatakse küllastuskõverate arvestamist. Kõige enam levinud mudelid PSS/E tarkvara, mis leiavad käsitlemist sünkroongeneraatorite modelleerimisel on GENROU, GENROE, GENSAL ja GENSAE. Lisaks nendele on võimalik kasutada ka teisi mudeleid aga seda siis vastavalt vajadusele.

Generaatorite ergutussüsteemide vallas on arengud aastate jooksul olnud olulisemad ning seetõttu on ergutusregulaatorite kohta välja töötatud ligemale 20 erinevat standardset mudelit. Üldjuhul on piisav määratleda ergutussüsteemi tüüp (DC, AC, ST) ja seejärel uurida selle omadusi ning määrata konkreetne tüüp. Üldjuhul on tänapäeval jõutud niikaugemale, et ergutus-

süsteemide modelleerimisel kasutatakse erinevate tootjate lahenduste korral teatud tüüpi standardseid mudeleid. Olukorras, kus standardset mudelit ei ole saadaval tuleb uurida kas erinevate parameetrite kombineerimisega on võimalik muuta standardne mudel vastavaks konkreetsele regulaatorile. Kui selline lähenemine ei ole võimalik, siis tuleb vastav ergutusregulaator ise modelleerida. Sünkroongeneraatori ja tema erinevate regulaatorite mudel PSCAD tarkvaras on esitatud joonisel 5.20.



Joonis 5.20. Sünkroongeneraatori mudel PSCAD tarkvaras.

Lisaks sünkroongeneraatori ja selle ergutusregulaatori mudelitele võib võrguarvutustes tarvilik olla modelleerida ka turbiine ja turbiinide kiirusregulaatoreid. Joonisel 5.20 on täiendavalt kujutatud ka need komponendid. Turbiinide kiirusregulaatorite modelleerimiseks on välja töötatud ka standardsed IEEE mudelid, mis lähtuvad samuti kiirusregulaatori põlvkonnast ja selle omadustest. Näiteks PSS/E tarkvaras on kiirusregulaatorite modelleerimiseks kasutusel 36 erinevat mudelit. Enamlevinud neist on auruturbiinide korral IEEEG1 ja TGOV1. Viimane neis on suhteliselt universaalne ning võimaldab kujutada kiirusregulaatorit, kui kõik andmed selle kohta ei ole teada. See tingib küll mõningase ebamäärasuse, kuid võrguarvutuste raames loetakse, et see ei põhjusta suurt viga. Siinkohal tuleb siiski täpsustada, et kui eesmärgiks on turbiini ja selle kiirusregulaatori uurimine, siis on otstarbekas kasutada täpseid mudeleid.

Lisaks eelnevalt mainitud mudelitele omavad võrguarvutuste juures olulist tähtsust ka võnkesummuti ja erinevate ergutussüsteemi piirajate mudelid. Viimased pakuvad siiski huvi vaid, kui uuritakse pikaajalised pingestabiilsusega seotud protsesse. Sarnaselt eelpoolnimetatutega on ka need mudelid enamjaolt standardiseeritud vastavalt IEEE juhisteile. Võnkesummutite tarvis on kasutusel nelja erinevate tüüpi standardseid mudeleid. Üle- ja alaergutuspiirajate tarvis on näiteks PSS/E tarkvaras olemas viis mudelit alaergutuspiirajate ja kaks mudelit üleergutuspiirajate tarvis. Levinumad on UEL2 ja MAXEX2, kui tegelikkuses tuleb siiski vaadata konkreetset piiraja tüüpi ja vastavalt sellele valida võimalikest standardsetest mudelitest parim. PSCAD tarkvaras puuduvad piirajate mudelid ja need tuleb igal juhtumil ise koostada.

Lisaks eelpool nimetatud üldkasutatavatele mudelitele on standardiseeritud ka nt HVDC, tuulikute, FACTS seadmete jm elektrisüsteemi komponentide mudelid. Siinkohal siiski tuleb arvestada, et kõikide mudelite korral on tegemist ikkagi lihtsustustega ning saadud tulemuste analüüsimisel tuleb lähtuda füüsikaprotsessidest ning arvestada võimalikke kõrvalekaldeid seadmete tegelikest dünaamilisest karakteristikutest.

5.5 Mudelite verifitseerimine

Elektrisüsteemi dünaamiliste mudelite usaldusvääruse tõstmiseks tuleb koostatud mudeleid verifitseerida reaalsete võrgukatsetuste baasil. Üldjuhul leiavad sellised katsetused aset elektripaigaldise võrguga liitumise protsessi lõppfaasis. Teisalt, kui seadmed on juba võrgus ja nende kohta koostatakse mudelid hiljem, siis tuleb kas kasutada mõõtmisi normaaltalitluse perioodist ja oodata mõningaid dünaamilisi muutusi süsteemi talitluses ja uurida seadme käitumist nende ajal või korraldada täiendavaid katsetusi. Kuna üldjuhul on täiendavate katsetuste teostamine kallis, siis eelistatakse esimest varianti. Samas ei pruugi selline lähenemine alati anda tulemust, mistõttu tuleb seadmeid ja paigaldisi ka täiendavalt katsetada. Kuna elektrisüsteemi elementide karakteristikud (sh juhtimissüsteemide parameetrid) võivad aja jooksul muutuda, siis on otstarbekas teatud aja tagant neid uuesti katsetada ning seeläbi kontrollida ka mudelite vastavust tegelikkusele.

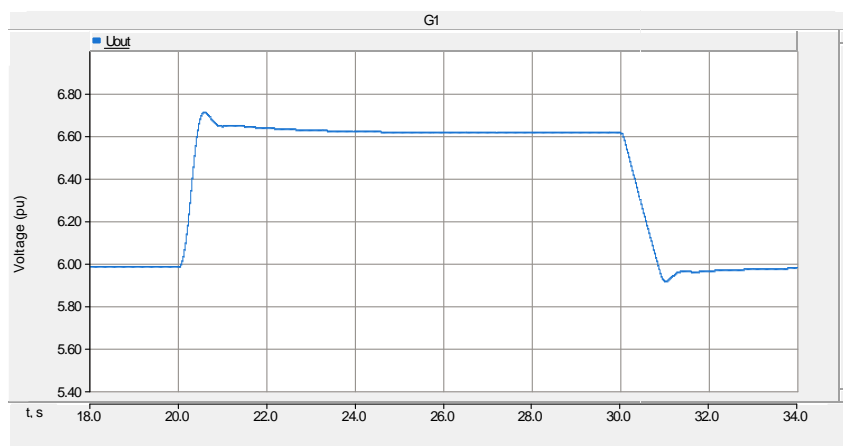
Mudelite verifitseerimine on suhteliselt keeruline protsess, kuna arvestada tuleb nii arvutus-tarkvarade ja nendes kasutatavate mudelite lihtsustusi kui ka mõõtmistel saadavate tulemuste tõlgendamise seotud põhimõtteid. Arvestada tuleb elektrisüsteemi omadustega ning seeläbi hinnata mudeli mõju süsteemile ja vastupidi. Võib ette tulla olukordi, kus tegelikkuses mõõdetud protsessid on põhjustatud elektrisüsteemi poolt ja mudeliga modelleerides neid ei ole võimalik korrata. Seega on olulise tähtsusega elektrisüsteemi elementide ja süsteemi dünaa-

mika modelleerimisega tegelevate töötajate pädevus ning teadmised erinevatest siirdeprotses-
sides ja mudelite koostamise põhimõtetest.

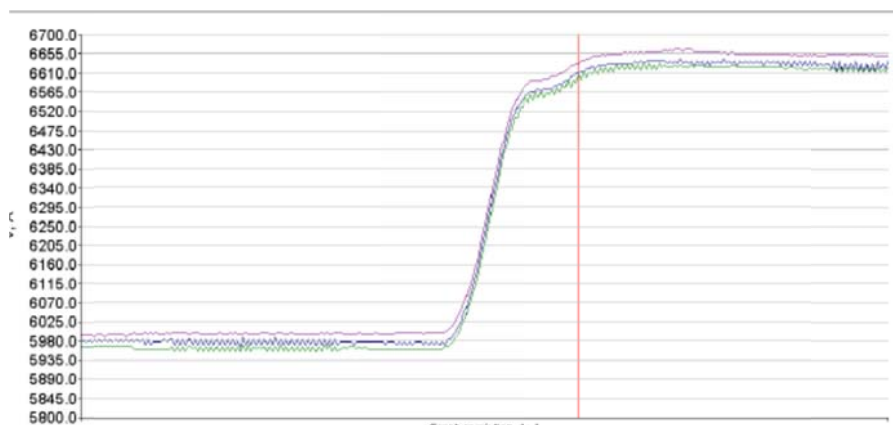
Elektrisüsteemi mudelite verifitseerimise aluseks on usaldusväärsete mõõteandmete olemas-
olu ehk teisisõnu algab mudelite verifitseerimise juba mõõtmiste planeerimisest ning korrekt-
sete katsetuste kavade koostamisest ja mõõtepunktide valikust. See on oluline selles mõttes, et
mudelite verifitseerimise teostamiseks tuleb plaanida katseid, mis näitaksid ära ja annaksid
olulist informatsiooni konkreetse mudeli käitumise uurimiseks ja võrdlemiseks ning mõõde-
takse selliseid parameetreid mida on võimalik saada ka modelleerimise tulemusena. Näiteks
generaatorite ja nende ergutusregulaatorite modelleerimisel ja verifitseerimisel on oluline
omada informatsiooni just erguti sisend- ja väljundsuuruste kohta. Siinkohal ei piisa ainult
generaatori lattide voolude ja pingete mõõtmistest. Viimaseid saab küll kasutada ja nende
põhjal ka mudeleid verifitseerida, kuid täpsemaks ja kiiremaks tulemuse saamiseks on tarvis
teada ka midagi muud. Teiseks oluliseks kriteeriumiks on kasutatavate andmete mõõtetihed-
use sobilikkus. Kindlasti ei ole sobilikud nt kümne sekundi keskmised mõõtmised, kui prot-
sess mis meid huvitab kestab alla poole sekundi. Sellest tulenevalt on oluline juba mõõtmiste
plaanimise faasis kindlaks teha mida täpselt me soovime saada.

Vaatleme siinkohal näitena järgmist juhtumit. Vastavalt Eesti Vabariigi võrgueeskirjale on
sünkroongeneraatorite ergutussüsteemidele esitatud teatud nõuded tühijooksutalitusel gene-
raatorite väljundpinge muutustele astmelise referentsväärtuse muutuse korral. Joonisel 5.21
on kujutatud PSCAD tarkvaras modelleeritud generaatori väljundpinge astmeline muutus re-
ferentsväärtuse muutumisel +10% ja -10%. Mudelite verifitseerimistel tuleb tähelepanu pöö-
rata siirdeprotsessi kestel olevale tõusu ajale ja ülevõnkele. Mõlema alusel on võimalik võr-
relda ja hinnata tegeliku süsteemi ja mudeli vastavust teineteisele. Võrdluseks esitame siinko-
hal ka generaatori mõõtetulemuste tulemusena saadud graafiku generaatori väljundpinge
muutusest, kui referentsväärtust muudetakse +10%. Esitatud tulemustest on võimalik näha
mõningast erinevust mõõdetud ja modelleeritud tulemuste vahel. Siinkohal on oluline uurida
generaatori ja selle erguti ning ergutusregulaatori mudelite vastavust tegelikkusele ning kont-
rollida kasutatavate parameetrite vastavust.

Sünkroongeneraatori ja selle ergutussüsteemi mudelite verifitseerimisel on oluline tähelepanu
pöörata generaatori väljundsuurustele nagu vool ja pinge. Täiendavalt pakuvad huvi võnke-
summuti käitumine ning ergutusregulaatori lagiergutuspinge ja voolu muutumised häiringute
kestel ja pärast häiringuid. Generaatorite ergutussüsteemide dünaamika analüüsimiseks ja
täiendavate teadmiste saamiseks on soovituslik lugeda kirjandust [16].



Joonis 5.21. Generaatori väljundpinge muutus pingereferentsväärtuse muutumisel +/- 10%.



Joonis 5.22. Generaatori väljundpinge muutus pingereferentsväärtuse muutumisel +10%.

Mudelite verifitseerimise teostamiseks on oluline omada korrektseid ja usaldusväärseid mõõteandmeid vaadeldavate protsesside ajast. Elektrisüsteemi mudelite verifitseerimisel saab ära kasutada ka laimõõtesüsteemi vahendusel saadud andmeid. Viimased on küll üldjuhul saadaval mõningate elektrivõrgu sõlmede ja/või liinide ja mitte spetsiaalselt generaatorite või elektripaigaldiste kohta. Sellest tulenevalt ei pruugi need otseselt sobida näiteks alajaama liitunud elektripaigaldise mudeli verifitseerimiseks. Teisalt, kui ette näha faasimõõteseadete konkreetse liituja lahtrisse, siis on mõõteandmed rohkem kasutatavamad ning tulemused ka seeläbi rohkem täpsemad. Selliste mõõteandmete baasil on võimalik uurida kasutatavate mudelite üldist reageeringut võrgus toimuvate protsesside suhtes. See lähenemine võib aga paljudel juhtudel olla piisav eriti arvestades missuguseid mudeleid missugusteks arvutusteks kasutatakse. Näiteks suure süsteemi stabiilsuse arvutusteks kasutatavate mudelite verifitseerimisel võib piisata laimõõtesüsteemi vahendusel saadavatest andmetest, kuid kui meil on eesmärk uurida mitme elektripaigaldise omavahelist mõju, siis ei pruugi sellisel tasemel olevatest andmetest saada

kätte kõike vajalikku infot ning teostada on tarvis täpsemaid mõõtmisi. Seega üldistatult võib öelda, et laimõotesüsteemide vahendusel saadud andmete abil on soovituslik verifitseerida süsteemi mudeleid ning analüüsida süsteemi üldisi protsesse.

5.6 Süsteemi mudelite verifitseerimine laimõõtmiste abil

Elektrisüsteemi mudelite verifitseerimisel võib vaadelda mitmeid tasemeid. Kas vaadeldakse süsteemi tervikuna või selle osasid. Üldises plaanis tuleb usaldusväärsete tulemuste saamiseks arvestada järgmist:

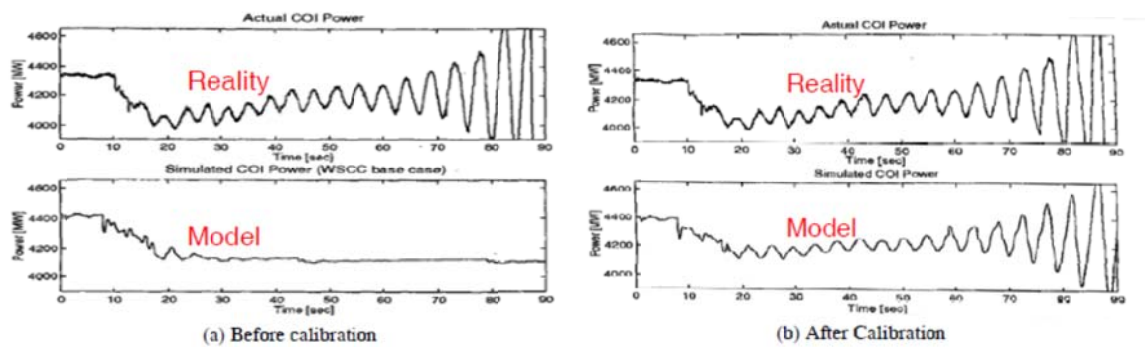
- Mõõteandmed peavad sisaldama piisavalt infot süsteemi dünaamika kohta, kuna eesmärgiks on just dünaamikamudelite verifitseerimine.
- Sündmustele eelnevad võimsusvoogude jaotumine peab mudelid olema sama, mis on süsteemis vahetult enne mõõtmiste teostamist.
- Modelleerimisel peaks dünaamikaprotsess olema sama nagu see oli reaalses süsteemis mõõtmiste ajal.

Süsteemi tasemel mudelite verifitseerimine on keerukas protsess. Süsteemi algtingimuste määratlemine ja modelleerimine võtab aega ning selle tarvis on vajalik koguda nii SCADA ja teiste mõõtesüsteemide andmeid. Suuremate süsteemide korral võib selline tegevus aega võtta kuid. Teiseks keeruliseks kohaks on süsteemis toimunud protsesside ajaline kindlakstege mine, sest suuremate häiringute ajal rakenduvad mitmed releed ja süsteemis võidakse teostada mitmeid nii automaatseid kui ka dispetšerite poolseid lülitamisi. Osaliselt on sellised sündmused taastatavad erinevate salvestite vahendusel, kuid siiski võib ette tulla juhtumeid, kus osadest toimingutest ei pruugi maha jääda jälge. Kolmandaks oluliseks komponendiks on tehnilise võimekuse olemasolu ettevõttes. Antud juhul on suuremate süsteemide korral tegemist sadade või tuhandete mudelitega, millest tulenevalt peab mudeli hindamiseks ja vajadusel täiendamiseks ja seadistamiseks olema olemas vajalikud töötajad ja teadmised.

Tulenevalt eelnevalt kirjeldatud puudustest võib otstarbekam lähenemine olla väiksema süsteemi osa verifitseerimine. Sellisel juhtumil on lihtsam ette valmistada süsteemi algtingimustele vastavat mudelit. Samuti ei ole tarvis läbi mängida kogu sündmuste ahelat ja piisavaks on ainult vaadeldavas süsteemi punktis toimunud muutused. Tulemuste hindamine on samuti lihtsam, kuna muutujate ja mudelite arv vaadeldavas piirkonnas on väiksem.

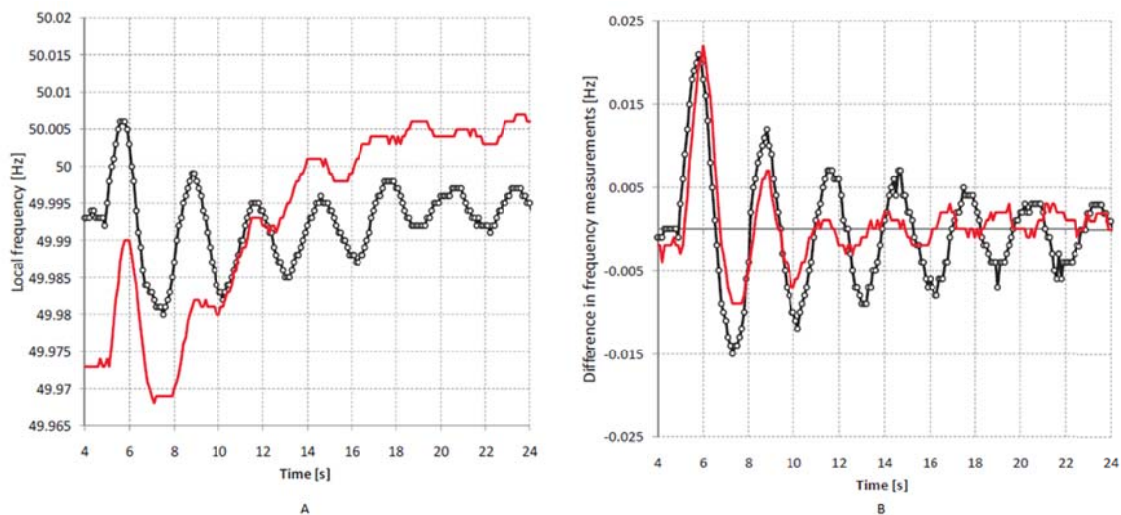
Hea näide mudelite verifitseerimise vajadusest on kujutatud joonisel 5.23. Joonisel on esitatud 1996. aasta 10. augusti *blackout* sündmused ja nende modelleerimine mudelitega enne ja pä-

rast mudelite verifitseerimist. Mudeli kontrollimisel tuli selgelt välja ebatäpsus ning pärast mudeli verifitseerimist on näha märgatav mudeli täpsuse tõus.



Joonis 5.23. Võimsusvoogude muutus piirkondade vahelisel ühendusel enne (a) ja pärast (b) mudeli verifitseerimist.[17]

Alamsüsteemi mudelite verifitseerimisel on oluline arvestada järgmise protseduuriga. Esmalt on tarvilik koguda faasimõõteseadmete poolt liitumispunktis mõõdetud suurused (pinge, nurk, sagedus, aktiiv- ja reaktiivvõimsus). Järgmiseks etapiks on nende mõõteandmete töötlemine eesmärgiga puuduvate andmete korrigeerimine ja andmetiheduse kontrollimine. Sellele järgneb vaadeldava alamsüsteemi arvutamine ja suuruste esitamine liitumispunktis. Verifitseerimise protsessi viimasteks osadeks on modelleerimise tulemuste võrdlus reaalsete mõõtetulemustega ning vajadusel mudelite täiendamine ja seadistamine. Mudelite verifitseerimise usaldusväarsuse tõstmiseks on tarvis kontrollida mudeli vastavust mitmetele võrgu sündmustele.



Joonis 5.24. Võnkeprotsesside jälgimine kasutades kohalikke mõõtmisi (vasak joonis) ja lai-mõõtesüsteemi (parem joonis) vahendusel saadud mõõtmisi. [18]

Maailmas on mitmeid näiteid laimõõtesüsteemide vahendusel saadud andmete kasutamisest elektrisüsteemi mudelite verifitseerimiseks. Soomes on saadud laimõõtmiste rakendamisel elektrisüsteemi analüüsimisel ja mudelite valideerimisel väga häid tulemusi. Tänu laimõõtesüsteemi omadustele on võimalik esitada elektrisüsteemis toimuvate protsesse otseselt ilmutatud kujul. Sellekohane näide on esitatud joonisel 5.24, kus vasakul graafikul on näidatud alajaamas tehtavad mõõtmised ja paremal joonisel laimõõtesüsteemi vahendusel saadud tulemused, kus sama nähtus on esitatud töödeldud kujul ja võimalik on otseselt näha erinevate süsteemi osade omavahelisi võnkumisi [18].

Samuti on häid tulemusi saadud laimõõtmiste baasil süsteemi talitluse hindamisel ja mudelite verifitseerimisel Mehhiko [19], Uus-Meremaa [20], Inglismaa [21], [22] ja USA [23] elektrisüsteemides.

5.7 Kokkuvõte

Elektrisüsteemi elementide dünaamilised mudelid ja nende baasil teostatavad võrguarvutused on oluliseks osaks elektrisüsteemi plaanimisel ning juhtimisel. Sellest tulenevalt peavad kasutatavad mudelid olema võimalikud täpsed ja kajastama tegelikkust. Elektrisüsteemi dünaamika hindamisel on tänapäeva elektrisüsteemides kõige olulisem roll sünkroonmasinatel ja nende juhtimissüsteemidel. Samuti omavad dünaamika seisukohast tähtsust koormuse modelleerimine ning alalisvoolühenduste ja mitmesuguste automaatikaseadmete korrektne modelleerimine. Tuleviku süsteemiarenguid silmas pidades muutuvad järjest olulisemateks läbi konverterite ühendavate seadmete ning nende juhtimissüsteemide modelleerimine.

Tähtsal kohal on elektrisüsteemi dünaamika modelleerimiseks kasutatavate mudelite verifitseerimine. Mudelite verifitseerimise aluseks on sobilikud mõõteandmed ja nende korrektne kasutamine ning tõlgendamine. Kasutada sobib nii lokaalseid mõõtmisi kui ka laimõõtesüsteemide vahendusel saadud mõõteandmeid. Samuti ei saa unustada mudeli verifitseerimist teostava isiku kompetentsi ja teadmisi.

Käesolev peatükk võtab kompaktselt kokku mudeldamise ja mudelite verifitseerimise erinevad etapid ning põhimõtted. Modelleerimisel on oluline teada mudelite koostamise põhimõtteid ja erinevate komponentide dünaamilisi omadusi. Oluline osa on verifitseerimisel ja selle põhimõtetel arvestades süsteemi suurusi ning saadaval olevaid mõõteandmeid.

5.8 Kirjandus

[1] P. Kundur. Power System Stability and Control. McGraw-Hill, 1994, 1176 pp.

- [2] M. Meldorf, J. Kilter. Elektrisüsteemi stabiilsus. TTÜ Kirjastus, 2011, 346 lk.
- [3] IEEE Standard 421.5-2005, IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. IEEE, 2006, 85 pp.
- [4] IEEE Standard 1110-2002, IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses. IEEE, 2002, 81 pp.
- [5] IEEE Task Force on Excitation Limiters, „Underexcitation Limiter Models for Power System Stability Studies“. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 10, no. 3, Sept. 1995, pp. 524-531.
- [6] Dynamic Models for Steam and Hydro Turbines in Power System Studies. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-92, pp. 1904-1915, 1973. (Committee Report).
- [7] J. Machowski, J. W. Bialek, J. R. Bumby. Power System Dynamics: Stability and Control, Second Edition. Wiley, 2008, 629 pp.
- [8] M. Ilić, J. Zaborszky. Dynamics and Control of Large Electric Power Systems. Wiley, 2000, 838 pp.
- [9] P. M. Anderson, A. A. Fouad. Power System Control and Stability, Second Edition. IEEE-Wiley Press, 2003, 658 pp.
- [10] M. Eremia, M. Shahidehpour. Handbook of Electrical Power System Dynamics: Modeling, Stability, and Control. Wiley-IEEE Press, 2013, 942 pp.
- [11] EMTDC User Guide – A Comprehensive Resource for EMTDC. Manitoba HVDC Research Centre, Feb. 2010, v.4.7.
- [12] PSCAD Electromagnetic Transients User Guide, Manitoba HVDC Research Centre, Feb. 2010, v.4.2.1.
- [13] PSS/E 33.5 Program Application Guide Volume 1, SIEMENS PTI, 2013, 606 pp.
- [14] PSS/E 33.5 Program Application Guide Volume 2, SIEMENS PTI, 2013, 734 pp.
- [15] PSS/E 33.5 Model Library manual, PTI, 2013, 750 pp.
- [16] IEEE Standard 421.2-2014, IEEE Guide for Identification, Testing, and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems. IEEE, 2014, 63 pp.

- [17] Z. Huang, B. Yang, D. Kosterev. Benchmarking of Planning Models Using Recorded Dynamics. IEEE PES Power System Conference and Exposition 2009, Seattle, WA, USA, 6 pp.
- [18] T. Rauhala, K. Saarinen, M. Latvala, M. Laasonen and M. Uusitalo, „Applications of Phasor Measurement Units and Wide-Area Measurement System in Finland,“ *PowerTech*, Trondheim, 2011.
- [19] E. M. Martinez, „Wide Area Measurement & Control System in Mexico,“ *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, Third Int. Conf.*, Nanjing, 2008.
- [20] J. C.-H. Peng, „Phasor Measurement Network and its Application on the New Zealand Grid: Overview and Experiences,“ *Power and Energy Society General Meeting*, 2011.
- [21] P. M. Ashton, G. A. Taylor ja A. M. Carter, „Future Wide Area Monitoring Requirements for the GB Transmission System,“ *10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission*, Birmingham, 2012.
- [22] J. Xia, A. Dysko. UK Transmission System Modelling and Validation for Dynamic Studies. 4th IEEE PES ISGT Europe 2013, 6-9.10.2013, Copenhagen, Denmark, 5 pp.
- [23] J. F. Hauer, W. A. Mittelstadt, K. E. Martin, J. W. Burns, H. Lee, J. W. Pierre, and D. J. Trudnowski. Use of the WECC WAMS in Wide-Area Probing Tests for Validation of System Performance and Modeling. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 24, No. 1, Feb 2009, pp. 250-257.

Kokkuvõte

Käesolev aruanne võtab kokku teadus-ja arendusprojekti „Eesti elektrisüsteemi laiseiresüsteemi analüüs ja arendamine“ teise etapi. Uurimistöö raames uuriti edasi võimalusi faasimõõteseadmete vahendusel saadavate andmete kasutamiseks Eesti elektrisüsteemi talitluse analüüsiks ja juhtimiseks. Edasi on arendatud uurimustöö eelmises etapis alustatud punkte ning samuti on alustatud mitme uue teemaga, milledest olulisem Eesti elektrisüsteemi modelleerimise ja analüüsi mõistes on reaalajasimulaator ja selle võimalused.

Uurimustöö aruanne koosneb kuuest peatükist ning neljast lisast. Esimeses peatükis vaadeldakse mõõteandmete andmeedastuse ja võimalike laiseirerakenduste kitsaskohtasid infoedastuse seisukohast. Oluliseks järeldus on, et tänapäeval faasimõõtmiste edastamiseks kasutatavad sidekanalid ei tohiks põhjustada häiringuid laiseirefunktsioonide töös, kuid siiski tuleb rakenduste loomisel arvestada võimalike andmete edastamise kiiruste ja latentsusega seotud teguritega.

Aruande teine peatükk käsitleb ülekandeliinide seiret faasimõõturite abil. Liini mõlemasse otsa paigaldatud faasimõõturite sünkroniseeritud mõõteandmetest on teoreetiliselt võimalik reaalajas välja arvutada liinijuhtme keskmine temperatuur ja ülekandekadod. Antud peatükk käsitleb selliste arvutuste teoreetilist tausta, reaalselt teostatavust ja mõõtetäpsust. Lisaks vaadeldakse liini soojusliku talitluse jälgimist meteoroloogiliste mõõtmiste alusel. Peatüki teoreetilistes osades selgitatakse ja uuritakse lähemalt, kuidas mõõdetud pinge- ja voolufaasoritest ülekandeliini mudeli parameetreid määrata. Seejärel käsitletakse liiniparameetrite seost ülekandekadudega ning viimaseks uuritakse, kuidas antud rakenduste mõõtemääramatusi hinnata. Lisaks sellele on iga rakenduse kohta teostatud näidisarvutusi reaalselt mõõtmiste andmetest.

Kolmas peatükk käsitleb laiseiresüsteemi üldisemalt elektrisüsteemi oleku mõõtmise seisukohast. Kõigepealt vaadeldakse olemasolevate faasimõõturitega jälgitavate süsteemielementide talitluse mõõtmist ja võrreldakse leitud olekuväärtusi estimaatori tulemustega. Hetkel saadaval olevatest mõõteandmetest eraldatakse võimalikult paljude suuruste väärtused ja hinnatakse nende täpsust võrdluses estimaatori andmetega. Sealjuures vaadeldakse nii faasimõõturitega otseselt mõõdetavaid suurusi kui ka nende mõõteandmete põhjal estimeeritud teisi suurusi. Peatüki teises osas käsitletakse faasimõõturite optimaalset paigutust, et leida parimad lahendused 330 kV võrgu täielikult jälgitavaks tegemiseks. Optimaalse paigutuse ülesanne on püstitatud kirjanduses valdavalt levinud lähenemisest veidi erinevalt, et arvestada reaalselt

paigaldatavate faasimõõturite piirangutega. Lisaks sellele arvestatakse lahenduses ka erinevate töökindluskriteeriumitega ja tuuakse sisse lisatingimus, mis tagab vajalikud mõõtmised liinide võimsusvoogude ja ülekandekadude estimateerimiseks faasimõõturiteta liinidel.

Neljandas peatükis käsitletakse ülekandevõrgu seire ja võimalike tulevikusuundadega seotud küsimusi. Peatüki koostamisel on eesmärgiks olnud anda lugejale ülevaade olemasolevatest süsteemidest, põhimõtetest ja lahendustest ning seejärel käsitleda uusi ja tulevikku suunatud lahendusi. Üheks selliseks on laimõõtmiste rakendamine elektrisüsteemi kaitsmise ja juhtimise raames. Täiendavalt pööratakse tähelepanu elektrisüsteemi stabiilsuse ning sageduse ja pinge reguleerimisega seotud küsimustele. Viimased on eriti olulised ka laiseire võimalike tulevikulahenduste seisukohalt.

Viies peatükk hõlmab elektrisüsteemi mudeldamise ja mudelite verifitseerimisega seotud teemaatikaid. Antakse ülevaade elektrisüsteemi olulisemate elementide dünaamilistest mudelitest ning nende analüüsi põhimõtetest. Samuti käsitletakse dünaamika modelleerimisest kahes Elering AS poolt kasutatavas võrguarvutustarkvaras. Võrguarvutuste täpsus oleneb otseselt kasutatavate mudelite täpsusest, millest tulenevalt on vaadeldud ja analüüsitud mudelite verifitseerimisega seotud küsimusi. Peatüki teises pooles vaadeldakse laimõõtmiste kasutamise võimalusi elektrisüsteemi mudelite verifitseerimisel.

Kuues peatükk kirjeldab ja analüüsib reaajasimulaatorite temaatikat ning nende võimalusi lähtuvalt laiseire temaatikast. Lisaks analüüsile on TTÜ elektroenergeetika instituut koostanud hankedokumendid reaajasimulaatori hankimiseks ning Eesti elektrisüsteemi mudelite koostamist reaajasimulaatoris alustatakse 2015. aastal.

Uurimustöö baasil on koostatud mitmeid teaduslikke artikleid ning need on lisatud lissasse 1. Teine lisa annab ülevaate Eesti elektrisüsteemi süsteemiautomaatikast. Kolmas ja neljas lisa käsitlevad reaajasimulaatori temaatikat.

Uurimistöö raames on Eesti elektrisüsteemi laiseiretemaatikat analüüsitud ning edasi arendatud. Olulisemateks punktideks, mida uurimustöö teise etapi raames esile tuua on faasimõõteseadmete vahendusel saadavate andmete reaalse kasutamise võimaluste analüüs, alates ülekandeliinide kadude temaatikast kuni faasimõõteseadmete optimaalse paigutuseni. Samuti on olulistest tulemusteks andmeedastusega ja võimalike tulevikuga seotud laiseirelahenduste temaatika. Kokkuvõttes on uurimustöö kestel siiski jõutud järeldusteni, et alustatud tööd on tarvis jätkata.

Kokkuvõtlikult toome siinkohal välja järgmiste etappide uurimusteemad:

- Meteoroloogilistel mõõtmistel põhinevat liini soojusliku talitluse mudeldamist tuleks täiendavalt võrrelda referentsväärtustega, mille täpsus on teada, et saada aimu antud meetodi kasutatavusest. Kui on võimalik saada meteoroloogilisi mõõtmisi väiksemate ajavahemike kui tunni aja tagant, saaks kasutada ka väiksema sammuga mõõdetud liini koormust. Sel juhul võiks ka vaadelda soojuslikku talitlust mitte ainult staatilisena, vaid arvestada soojenemise ja jahtumisega ajas muutuvatena.
- Ülekandeliini mõlema otsa faasimõõtmistel põhinevaid liini jälgimise rakendusi (so kadude ja liiniparameetritel põhinev läbilaskevõime hindamine) on vaja täiendavalt katsetada mõõteandmetega, mis on mõõdetud suurema koormuse korral. Praeguseks näidisarvutuste jaoks saadud andmete puhul jäävad liini madalast koormusest tingitud mõõtevigade tõttu mõõtemääramatused liiga suureks, et teha järeldusi antud jälgimismeetodite kasutatavuse kohta.
- Faasimõõtmistel põhinevat süsteemi oleku mõõtmist saab täiendavalt uurida, kui süsteemi on lisandunud uusi faasimõõtureid. Kui praeguseks planeeritud faasimõõturid on lisandunud, on enamik 330 kV võrgu sõlmedest ja liinidest jälgitavad. Laiseiresüsteemi mõõtmisi saab täiendavalt võrrelda SCADA mõõtmistel põhinevate estimaatori tulemustega ja analüüsida reaajas süsteemi oleku mõõtmise täpsust. Käesolevas aruandes on võrreldud ühe ajahetke tulemusi, kuid täiendavalt tuleks uurida, kuidas kummagi mõõtmise väärtused ja nende erinevused ajas muutuvad.
- Edasi tuleks arendada laimõõtmistel põhinevaid võimalikke süsteemiautomaatikaga seotud lahendusi. Uurimisteemaks on Eesti elektrisüsteemi kontekstis sobilike lahenduste ja rakenduste võimalikkus ning rakendatavus. Oluliseks ajendiks on plaanitav Eesti elektrisüsteemi ühendamine Lääne-Euroopa sünkroonalaga ning alalisvooluühenduste ja avariireservelektrijaama talitus sellistes tingimustes.
- Reaalajasimulaatori ja selle võimaluste analüüs nii laiseire- kui ka mudeldamise temaatikast lähtuvalt. Siinkohal pakuvad huvi Eesti elektrisüsteemi mudelite koostamine ning analüüsid võimalike juhtimisalgoritmide koostamiseks ja katsetamiseks. Samuti pakuvad huvi erinevate seadmete funktsionaalsus lähtuvalt laiseire põhimõtetest.

Lisa 1 Uurimistöö tulemusel avaldatud teaduslikud artiklid

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.