



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

ELEKTRIAAMA GENERAATORITE
REAKTIIVVÕIMSUSTE JUHTIMISSÜSTEEMI
ARENDAMINE JA SELLE KATSETAMINE
REAALAJASIMULAATORIGA

DEVELOPMENT OF REACTIVE POWER CONTROL SYSTEM FOR POWER PLANT
WITH MULTIPLE GENERATORS AND ITS TESTING WITH POWER SYSTEM REAL-
TIME DIGITAL SIMULATOR

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Guido Andreesen

Üliõpilaskood: 183042 AAVM

Juhendaja: Dotsent Jako Kilter

Tallinn, 2020

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201....

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Guido Andreesen

Lõputöö liik: Magistritöö

Töö pealkiri: Elektriijaama generaatorite reaktiivvõimsuste juhtimissüsteemi arendamine ja selle katsetamine reaalajasimulaatoriga

Kuupäev: 20.05.2020

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): dotsent Jako Kilter

Sisu kirjeldus: Elektrisüsteemiga liitunud tööstuselektriijaamade talitluse põhiolemuseks on eelkõige selle elektripaigaldise elektrienergiaga varustamine lähtudes varustuskindluse ja optimaalsuse nõuetest. Määravaks selles protsessis peetakse reaktiivvõimsuse tasakaalustamist paigaldise siseselt ja ühe võimalusena saab kasutada sünkroongeneraatoreid tagamaks nõutav reguleerimisvõimekus. Käesoleva magistritöö eesmärgiks on välja arendada tööstustarbija elektripaigaldise reaktiivvõimsuse reguleerimise juhtimissüsteem arvestades elektripaigaldise olemust ja kulude optimaalsuse tingimusi.

Alusena kasutati reaalset VKG OÜ elektriijaama, et saavutada Elering AS poolt hallatava põhivõrguga seonduvas liitumispunktis reaktiivenergia vahetuse minimeerimine. Siinkohal tugineti erinevatele generaatorite vahel reaktiivvõimsuse jagamise meetoditele, et optimeerida võimsuskadusid. Samuti katsetati reaktiivvõimsuste juhtimissüsteemi reaalaja simulaatoriga. Konstrueeritud reguleerimisloogikat kontrolliti omakorda veel tööstuskontrolleriga.

Kokkuvõtavad tulemused näitasid põhivõrgu ja elektriijaama vahelises liitumispunktis mõõdetava reaktiivvõimsuse vahetuse minimeerimise saavutamist. Samuti osutus võimalikuks eristada generaatoreid ning reguleerida nende reaktiivvõimsust optimaalset langetades sealjuures elektriijaama liinides võimsuskadusid. Täiendavalt alanevad ettevõtte tegevuskulud vastava juhtimissüsteemi kasutamisel. Magistritöö resultaadid on rakendatavad käesolevat alusena võttes erinevates elektriijaamades või tööstusobjektides reaktiivvõimsuse reguleerimissüsteeme luues.

Märksõnad: ergutussüsteem, elektriijaam, generaator, juhtimissüsteem, kontroller, minimeerimine, nõudlus, optimeerimine, reaalajasimulaator, reaktiivvõimsus, võimsuskaod

ABSTRACT

Author: Guido Andreesen

Type of the work: Master Thesis

Title: Development of Reactive Power Control System for Power Plant with Multiple Generators and its Testing With Power System Real-Time Digital Simulator

Date: 20.05.2020

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisor(s) of the thesis: Associate Professor Jako Kilter

Abstract: The main essence of the operation of industrial power plants connected to the electricity system is supplying electricity to this electrical installation based on the requirements of security of demand and optimality. The balancing of reactive power inside the installation is considered to be crucial in this process, and as an option, synchronous generators can be used to ensure the required control capacity. The aim of this master's thesis is to develop a control system for the regulation of the reactive power of an industrial consumer's electrical installation, taking into account the nature of the electrical installation and the conditions of cost optimization.

The real VKG OÜ power plant was the basis in order to achieve the minimization of reactive energy exchange at the connection point between the transmission network managed by Elering AS. Additionally, various methods of reactive power distribution between generators were used to optimize power losses. The reactive power control system was also tested with a real-time simulator. The designed control logic was in turn checked by an industrial controller.

The summary results showed that the minimization of the reactive power exchange measured at the connection point between the transmission network and the power plant was achieved. It also proved possible to differentiate the generators and regulate their reactive power optimally, thereby reducing power losses on the power plant lines. In addition, the company's operating costs are reduced when using the respective management system. The results of the master's thesis can be applied as a basis for creating reactive power control systems in various power plants or industrial facilities.

Keywords: excitation system, power plant, generator, control system, controller, minimisation, demand, optimisation, real-time simulator, reactive power, power losses

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Elektrijaama generaatorite reaktiivvõimsuste juhtimissüsteemi arendamine ja selle katsetamine reaalaajasimulaatoriga
Lõputöö teema inglise keeles:	Development of Reactive Power Control System for Power Plant with Multiple Generators and its Testing With Power System Real-Time Digital Simulator
Üliõpilane:	Guido Andreesen 183042 AAVM
Eriala:	Elektroenergeetika
Lõputöö liik:	Magistritöö
Lõputöö juhendaja:	Dotsent Jako Kilter
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	1.06.2020
Lõputöö esitamise tähtaeg:	20.05.2020

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Ülekandevõrgu ehk Elering AS liitumispunktis mõõdetakse sellest läbiminevat aktiiv- ja reaktiivvõimsust. Vastavalt saadud suurusele määratakse liitumispunktiga ühendatud elektrienergia tarbijale või tootjale Elering AS poolt kinnitatud elektrivõrgutariifide põhjal kohustus tasuda tarbitud elektrienergia eest. Erinevalt aktiivvõimsusest tuleb seda teha ka ülekandevõrku saadetava reaktiivvõimsuse osas. Nõnda osutub elektrienergia tootjate jaoks oluliseks kulude minimeerimise seisukohast vältida liitumispunkti kaudu mõlemas suunas liikuva reaktiivvõimsuse koguseid või hoida neid võimalikult madalal.

Lähtuvalt sellest, et elektrienergia tootjad ehk elektrijaamad, milledes asetsevad generaatorid, saavad viimastel reaktiivvõimsuse genereerimist muuta, muutub reaalseks võimalus vähendada seda tehes ülekandevõrguga vahetatavat reaktiivvõimsust. Teoreetiliselt tähendab mainitu generaatorite ergutussüsteemide ühtset juhtimist tuginedes liitumispunktis mõõdetavale vastavale

energiakogusele. Nõnda toodetakse elektriijaama sisestele tarbijatele vajaminev reaktiivvõimsus kohapeal ja seeläbi suudetakse madaldada lisaks energiakadudele ka Elering AS tariifide eest tasutavaid summasid. Samas, mitme generaatoriga elektriijaamades tuleb generaatorite ergutite optimaalseks reguleerimiseks põhineda sobival meetodikal ja tehnilistel lahendustel. Siinkohal kerkivad esile ka kindlate elektriijaamade omapärad.

Käesolev lõputöö loob teatud Eesti energiatootmisüksust alusena võttes laiemalt rakendatava meetodika kasutades generaatorite reaktiivvõimsuse juhtimist võrgutasude ja energiakadude vähendamisel. Sealjuures võttes arvesse ühtlasi võimalikke generaatorite tööpunkte on elektriijaama seisukohalt saavutatav piisavalt optimaalne generaatorite reaktiivvõimsuste genereerimine. Muuhulgas osutub realiseeritavateks osaliselt väljakujundatava meetodika rakendamine sobivate seadmetega nagu kontrollid.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on Eestis paiknevat VKG OÜ elektriijaama alusena võttes välja arendada meetodika ja lahendused selles asetsevate generaatorite reaktiivvõimsuse ühtseks juhtimiseks.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Eestis asetseva elektriijaama ja selle generaatorite modelleerimine arvutusprogrammis RSCAD, et oleks võimalik välja arendatavate meetodikate ja lahenduste katsetamine
- Kasutatava näiteelektriijaama generaatorite ergutussüsteemide jaoks reaktiivvõimsuste reguleerimise juhtimise meetodika välja arendamine ja selle raames võimalike rakendusmeetodite võrdlemine
- Koostatud meetodikal põhineva ja arvutusprogrammis RSCAD modelleeritud lahenduse katsetamine reaajasimulaatoriga RTDS
- Näiteelektriijaamas paikneva automaatselt reaktiivvõimsust reguleerida võimaldava generaatori jaoks lahenduse väljatöötamine arvutusprogrammis LabView ning selle katsetamine National Instrumenti tööstuskontrolleriga ja reaajasimulaatoriga RTDS

4. Lähteandmed

Lõputöö raames kasutatakse Eestis paikneva elektriijaama poolt edastatud andmeid selle trafode, reaktorite, ühendusliinide, objektisiseste koormuste ja generaatorite kohta.

5. Uurimismeetodid

Lõputöös püstitatud ülesannete lahendamisel põhinetakse ennekõike arvutusprogrammidega RSCAD ja LabView tehtavatel elektrijaama sisese elektrivõrgu ning generaatorite reaktiivvõimsuste juhtimissüsteemi modelleerimistel ning nende vastavate programmidega jooksutamisel. Samuti katsetatakse konstrueeritud lahendusi reaajasimulaatoriga RTDS ning National Instrumenti tööstuskontrolleriga.

6. Graafiline osa

Olulisemate joonised väljaarendatava generaatorite reaktiivvõimsuste juhtimissüsteemi ja modelleeritud võrgu- ja lülitusskeemide kohta esitatakse peamiselt töö põhiosas.

7. Töö struktuur

Loetelu töö peatükkidest koos alapeatükkide, punktide ja alapunktidega.

- Sissejuhatus
- Teoreetiline ülevaade
- Generaatorite reaktiivvõimsuste juhtimise meetoodika
 - Võimalike reaktiivvõimsuste juhtimise meetoodikate võrdlus
- Näiteelektrijaama kirjeldus
- Reaktiivvõimsuste juhtimise meetoodika rakendamine reaajasimulaatoriga
 - Saavutatud tulemuste analüüs
 - Majanduslik analüüs
- Ühe generaatori reaktiivvõimsuse juhtimine tööstuskontrolleriga
 - Saavutatud tulemuste analüüs
- Kokkuvõte

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Lõputöös kasutatakse järgnevaid lähteteabe kohti:

- IEEE Explore ja ScienceDirect ning sarnaste võrgukülgede teadusartiklid
- Eestis asetseva elektrijaama poolt edastatud aruanded
- Eestis paikneva elektrijaama ja TTÜ ühised aruanded
- Eestis toimiva elektrijaama poolt TTÜle esitatud teave
- Uuritava teemaga seotud raamatud
- A. J. Wood, B. F. Wollenberg, G. B. Sheblé, Power Generation Operation and Control, Wiley, New Jersey, USA, 2014, 629 pp.

- N. M. Tabatabaei, A. J. Aghbolaghi, N. Bizon, F. Blaaberg, Reactive Power Control in AC Power Systems, Springer, 2007, 631 pp.
- Norman S. Nise, Control Systems Engineering, John Wiley Sons, Pomona, USA, 2011, 915 pp.

9. Lõputöö konsultandid

10. Töö etapid ja ajakava

- Kirjanduse läbitöötamine (3.1.2020)
- Teoreetilise osa kirjutamine (3.2.2020)
- Modelleerimise teostamine (3.3.2020)
- Uuringu tulemuste kirjeldamine (3.4.2020)
- Järelduste kirjutamine (3.4.2020)
- Kokkuvõtte koostamine (3.4.2020)
- Töö esimene versioon valmis (3.4.2020)
- Juhendajale läbilugemiseks saatmine (3.4.2020)
- Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine (3.5.2020)
- Töö lõplik versioon valmis (11.5.2020)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	3
ABSTRACT	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	5
EESSÕNA.....	11
SISSEJUHATUS.....	12
1. REAKTIIVVÕIMSUS ELEKTRISÜSTEEMIS.....	15
1.1 Reaktiivvõimsus ja selle mõjud.....	15
1.2 Sünkroongeneraatorite ergutussüsteem	17
1.3 Reaktiivvõimsuse regulaator	19
1.4 Reaktiivvõimsuse reguleerimise majanduslik aspekt.....	22
2. GENERAATORITE REAKTIIVVÕIMSUSE JUHTIMISE METOODIKAD	25
2.1 Generaatorite eristamine meetodid	25
2.1.1 Reaktiivvõimsuse jaotamine võrdeliselt	27
2.1.2 Reaktiivvõimsuse jaotamine proportsionaalselt	29
2.1.3 Reaktiivvõimsuse jaotamine järjestikuliselt	30
2.1.4 Reaktiivvõimsuse jaotamise lisakriteeriumid.....	31
2.1.5 Reaktiivvõimsuse jaotamine ühendusliinide võimsuskadude järgi	33
2.1.6 Reaktiivvõimsuse jaotamine ühendusliinide võimsuskadude suhteliste juurdekasvude järgi	35
2.1.7 Täiendavad võimalused ja peamiste meetodite võrdlus	37
2.2 Reaktiivvõimsuste reguleerimise jaoks vajalikud sisendid	40
2.3 Generaatorite reaktiivvõimsuste fikseerimine	44
3. REAKTIIVVÕIMSUSTE JUHTIMISE METOODIKA RAKENDAMINE REAALAJASIMULAATORIGA	50
3.1 Käsitletava elektripaigaldise ülevaade	50

3.2 Reaalajasimulaatori ülevaade.....	54
3.3 Reaktiivvõimsuse juhtimissüsteemi konstruktsioon.....	56
3.4 RSCAD programmpõhine ülesehitus	68
3.5 Juhtimissüsteemi rakendamise tulemused	75
3.6 Majanduslik-tehniline analüüs.....	87
4. ÜHE GENERAATORI REAKTIIVVÕIMSUSE JUHTIMINE	92
4.1 Tööstuskontroller NI cRIO 9045.....	92
4.2 Koostatud katsestend	94
4.3 Kontrolleri programmpõhine ülesehitus	97
4.4 Kontrolleri rakendamise tulemused	107
KOKKUVÕTE.....	112
SUMMARY	115
KASUTATUD KIRJANDUS	117

EESSÕNA

Käesoleva magistritöö kujunes välja ühest TTÜ elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi ning VKG OÜ vahel sõlmitud koostööprojektist, millesse olin otseselt kaasatud. Vastav lahendatav teema pakkus isiklikult palju huvi ning andis rohkelt uusi teadmiseid, mida saab ka edaspidiselt kasutada.

Siinkohal soovin tänada dotsent Jako Kilterit, kes võimaldas mul selle projektiga tegeleda.

Samuti kuuluvad tänusõnad nooremteadur Tarmo Trummalile, kelle asjakohased selgitused nii reaalajasimulaatori kui ka tööstuskontrolleri kohta olid vägagi konstruktiivsed. Lisaks teadis ta täpselt, kuidas neid kahte seadet omavahel ühendada ning sedamööda tegi mitmedki takistused kiirelt ületatavateks.

Muuhulgas pean meeles ja edastan tänud nooremteadur Madis Leinaksele, kelle positiivne suhtumine ning tarkuseterad andsid rohkelt edasiviivaid mõtteid. Tema erialalised oskused vajavad veelkordset tunnustust ja neid läks päris mitmelgi korral vaja.

Tänan ka nooremteadur Tanel Sarnetit juhiste eest, kuidas modelleerida elektripaigaldist ja selles paiknevaid elemente.

SISSEJUHATUS

Käesoleva magistritöö raames kirjeldatakse elektrijaama või tööstusobjekti sisemiste generaatorite rakendamise võimalikke lahendusi reaktiivvõimsuse tootmise eesmärgil. Nimelt on elektrisüsteemis üheks vajalikuks komponendiks reaktiivvõimsus, mida tekitavad ja tarbivad erinevad elemendid nagu liinid, trafod ja generaatorid. Samuti määrab reaktiivvõimsuse kogus teatud võrgu punktis ehk sõlmes ära selles oleva pinge suuruse. Sedamööda on võimalik reaktiivvõimsuse juurde genereerimisega või vähendamisega muuta sõlme pinget. Säärane olukord võib tekkida näitena koormuse või teatud liini võimsusvoo muutuse korral. Samas, reaktiivvõimsuse reguleerimisega seonduvad veel majanduslikud väljundid nagu ühendusliinides võimsuskadude alandamine ja teatud punktides reaktiivvõimsuse vahetuse minimeerimine.

Viimane aspekt võib olla aktuaalne mitmesugustele tööstusobjektidele ja seal hulgas elektrijaamadele, mis sisaldavad kohapealseid generaatoreid või asünkroonmootoreid ning reaktiivvõimsust vajavaid tarbijaid. Olukorras, milles suudetakse ettevõtte lokaalse elektrivõrgu piires varustada koormusvajadused enda vahenditega ehk seadmetega, tekib võimalus olla põhimõtteliselt sõltumatu suuremast süsteemist nagu põhivõrk. Resulteeruvalt vähendatakse esmaselt liitumispunktis mõõdetavat reaktiivvõimsuse kogust ja teisena sobivate generaatorite reaktiivvõimsuse juhtimisega võrgusiseste ühendusliinide võimsuskadusid.

Sedamööda osutub vajalikuks konstrueerida efektiivne generaatorite reaktiivvõimsuste üldine reguleerimise süsteem, millega suudetakse täita vajalikke eesmärgi. Käesolevalt vaadeldaksegi täpsemalt ühe säärase lahenduse võimalikke ülesehitusi, piirtingimusi, sisend- ja väljundväärtuste saamist ning generaatorite eristamist üksteisest. Seejärel kasutatakse spetsiaalseid modelleerimis- ja arvutusprogramme ning seadmeid nagu reaalaaja simulaator ja tööstuskontroller, et selgitada välja kirjeldatud lahenduste ootuspärane toimimine.

Kokkuvõtlikult saab magistritöö eesmärgina sätestada teatud elektrijaama aluspõhjanaan kasutades sellele generaatorite reaktiivvõimsuse reguleerimise süsteemi konstrueerimise. Täpsemalt öeldes tuginetakse elektrijaama näol VKG OÜ Põhja nimelisele elektripaigaldisele. Samuti analüüsitakse mitmesuguseid võimalusi reguleerimise juhtimise sooritamiseks ning arutletakse sobivate valikute üle. Magistritöö hüpoteesina püstitatakse, et õigeid süsteemseid reaktiivvõimsuste reguleerimise lahendusi kasutades on võimalik rakendada objektsiseseid generaatoreid reaktiivvõimsuse tootmises, selle juhtimises ja võimsuskadude alandamisel. Lõplik eesmärk, ehk objekti põhivõrguga siduvas liitumispunktis mõõdetava reaktiivvõimsuse ja elektrijaamas paiknevate ühendusliinide võimsuskadude minimeerimine, saavutatakse seda võimaldava lahenduse väljatöötamisel ning piisavalt optimaalse generaatorite vahel reaktiivvõimsuse jagamise metodika rakendamisel.

Tulenevalt sellest tekib kirjeldatud reaktiivvõimsuste regulaatorit paigaldades elektrijaamadel või tööstusobjektidel võimalus, nagu eelnevalt mainitud, pakkuda sisemistele tarbijatele kohapeal toodetavat reaktiivvõimsust ning langetada energiakadusid ja majanduslikku seost põhivõrgu haldajaga. Lisaks saab vajadusel, sõltuvalt pingeastmetest, suurendada või vähendada trafode primaarpoole pinget ning sedamööda toetada laiema elektrivõrgu efektiivset toimimist.

Teoreetiliselt saavad ennekõike säärase generaatorite reaktiivvõimsuste reguleerimise võimekuse omamisest kasu objektid, millel on kohapealne reaktiivvõimsuse nõudlus. Põhimõtteliselt oleks siinkohal ikkagi tegemist tööstuslikku laadi ettevõtetega, sisaldades kas sünkroongeneraatoreid või asünkroonmootoreid. Viimaseid läheb tarvis näitena erinevate tootmisprotsesside käitamisel või on need selle ühed väljundid. Samuti võib veel esile tõsta reaktiivvõimsuse juhtimise objekti suurema elektrisüsteemiga siduvas alajaamas pinge reguleerimise eesmärgil.

Muuhulgas ei ole ülimalt keerukas paigaldada objekti piirides paiknevatele generaatoritele või sarnastele käesoleva magistritöö raames esile tõstetud meetodikatele ning regulaatori konstruktsioonidele tuginevat lahendust. Vaja on kasutada sobivat tööstuskontrollerit, mille tarkvaras ehitatakse üles reaktiivvõimsuse või reaktiivvõimsuste juhtimisloogika. Samuti tuleb arvestada generaatorite sobivusega ning vajadusel täiendada need automaatset reaktiivvõimsuse reguleerimist võimaldavate lülidega. Lisaks on oluline tagada kõigi reguleerimise jaoks nõutavate mõõteväärtuste kiire kontrollerisse jõudmine tagamaks selle sujuva ja piisavalt optimaalse toimimise.

Lähtudes eelpool paika pandud eesmärkidest ja põhimõtetest struktureeritakse edaspidine magistritöö peatükkide lõikes järgnevalt. Esmaselt käsitletakse reaktiivvõimsuse üldist olemust, selle võimalikku tekitamist või kõrvaldamist ning seejärel keskendutakse juba täpsemalt ühele reaktiivvõimsust genereerivale ja tarbivale seadmele, milleks on sünkroongeneraator. Alustusena heidetakse pilk reaktiivvõimsuse muutmise jaoks vajalikule ergutussüsteemile ja ühe generaatori poolt toodetava või tarbitava reaktiivvõimsuse piirsuuruseid määravatele parameetritele. Edasiselt selgitatakse, kuidas on saavutatav ergutussüsteemi juhtimise näol ehk sätteväärtuste muutmisega soovitud reaktiivvõimsuse väljastatavad kogused.

Teises suuremas alaosas arutletakse pikemalt olukorra üle, milles on vajalik korrigeerida mitme generaatori reaktiivvõimsust. Erinevalt ainult ühe generaatori reaktiivvõimsuse juhtimisest on siinkohal vaja rakendada täiendavaid meetmeid ja valikuid. Nõnda pakutakse välja mitmeid meetodeid, mille järgi on võimalik eristada generaatoreid üksteisest ning tõstetakse esile nende eelised ja puudujäägid. Samuti võetakse vaatluse alla reaktiivvõimsuste reguleerimise jaoks vajaminevate sisendandmete saamine ja viimaste omavaheline seotus. Lisaks antakse ülevaade

teatud eesmärkide saavutamise juures vajaminevate regulaatorlülidest, millega jälgitakse mõõteväärtuste muutumist ja fikseeritakse generaatorite reaktiivvõimsused.

Seejärel esitletakse edaspidise modelleerimise alusena kasutatava elektriijaama põhilisemat ülesehitust ja parameetreid, millele järgnevalt selgitatakse reaalaja simulaatori olemust. Edasiselt hakatakse täpsemalt vaatlema generaatorite reaktiivvõimsuste juhtimissüsteemi konstruktsiooni ja vajaminevate sisendite määramist. Nende raames kirjeldatakse mitme generaatori reguleerimise toimumist ning erinevate rakenduvate lülide omavahelist seonduvust. Peatüki lõpetusena tuuakse välja olulisemad võrguarvutusprogrammis RSCAD kasutatud lülid, millede kaudu saavutatakse reaktiivvõimsuse reguleerimise eesmärgid. Lisaks veel erinevad lõppresultaate iseloomustavad graafikud, mis näitavad juhtimissüsteemi efektiivsust. Täiendavalt heidetakse pilk ka kasutatud elektriijaama jaoks välja arendatud reaktiivvõimsuste regulaatori majanduslikule otstarbekusele.

Viimase punktina peatutakse ainult ühe generaatori reaktiivvõimsuse reguleerimise juures. Siinkohal tehakse seda aga tööstuskontrolleriga, mis on reaalaja simulaatoriga kokku ühendatud. Nõnda on võimalik saavutada veelgi realistlikum keskkond. Samas selle komponentide koosseis põhineb ikkagi eelnevates peatükkides paika pandud lahendustel. Sedamööda mainitakse alustusena ära tööstuskontrolleri olulisemad parameetrid. Seejärel tõstetakse esile vastava regulaatori skeemipõhine ülesehitus, mis teostati arvutusprogrammis LabView. Lõpetusena on reaktiivvõimsuse reguleerimise tulemused vaadeldavad graafikute vormis.

Siinkohal on oluline rõhutada, et käesolev magistritöö põhineb reaalaja simulaatori ehk RTDSi rakendamisel, mis võimaldab saavutada suure sarnasuse reaalsele elektrivõrgu ja -paigaldistega. See lubab modelleeritud elektriijaamadesse lisada mitmesuguseid seadmeid, et jälgida nende ootuspärast toimimist, ilma tegelikku objekti külge midagi ühendamata. Nõnda on tegemist äärmiselt tähtsa seadmega arendustegevuse jaoks. Praegusel juhul asendas see VKG OÜ elektripaigaldist. Samuti konstrueeriti selles reaktiivvõimsuste juhtimissüsteem, et tõestada välja pakutud lahenduste sobivus. Lisaks rakendatakse magistritöö raames ka tööstuskontrollerit, mis iseenesest on aga juba reaalne element ja seetõttu tuleb arvestada selle riistvara omatoimeajaga, mis otseselt ei kajastu RTDSis. Samas, just kontroller paigaldatakse elektriijaama ja selle kaudu reguleeritakse generaatorite reaktiivvõimsuse tasemeid ning seetõttu otsustati veenduda selle sobivas käitumises.

Lisaks koostati magistritöö põhjal teaduskonverentsi *21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering* ehk EPE, toimumiskohaga Praha, Tšehhi, 19-21.10.2020, raames teadusartikkel pealkirjaga „Optimal Reactive Power Control in a Multi-Machine Thermal Power Plant“. Vastav artikkel oli magistritöö esitamise hetkel retsenseerimisel.

1. REAKTIIVVÕIMSUS ELEKTRISÜSTEEMIS

1.1 Reaktiivvõimsus ja selle mõjud

Efektiivselt toimivas elektrisüsteemis edastatakse peale aktiivvõimsuse veel reaktiivvõimsust. Viimast on vaja mitmesuguste elektrimasinate käivitamisel, töös hoidmisel ja nende kaudu elektrienergia ülekandmise jaoks. Aktiivvõimsusest ehk tarbimise ja tootmise tasakaalust sõltub energiasüsteemis olev sagedus, millel põhineb sünkroongeneraatorite ühtne pöörlemiskiirus ja erinevate seadmete optimaalne toimimine. Reaktiivvõimsusest sõltuvad aga pingete suurused elektriühenduste vahelistes sõlmpunktides. Juhul, kui reaktiivvõimsust on rohkem kui seda tarbida suudetakse, tõusevad pinge väärtused alajaamades ja tarbijatel. Teistpidi, reaktiivvõimsuse puudu jäämise korral langeb ühtlasi pinge suurus. [1] Mõlema situatsiooni puhul võivad tekkida takistused ja tõrked elektriseadmetel. Muuhulgas viivad väga pikaajalised pinge kaldumised väljapoole lubatud vahemikku üleüldise elektrisüsteemi lokaalse või tervikliku stabiilsuse kadumisele, mille tõttu lülituvad välja generaatorid ning alajaamad ehk katkeb tarbijate varustamine elektrienergiaga. Seetõttu osutub vajalikuks kontrollida piisavalt reaktiivvõimsuse liikumist ja koguseid elektrivõrgu komponentide vahel ja nende ühenduskohtades.

Elektrisüsteemide ettemääratud ja jätkusuutlikuks toimimiseks on vaja tagada kolme olulise pinge- ja reaktiivvõimsuse kontrolli tingimust [2]:

- Vaadeldava elektrivõrgu hulka kuuluvate elementide nagu generaatorite, trafode ja latistuste pinge suurus peab olema lubatud piirmäärade vahemikus;
- Pinge ja reaktiivvõimsuse kontrollimise efektiivsus mõjutab üleüldist elektrisüsteemi stabiilsust;
- Reaktiivvõimsuse ülekandmist elektrivõrgu komponentide vahel tuleb energiakadude minimeerimise eesmärgil võimalikult suures ulatuses vähendada.

Viimase väite optimaalsest rakendamisest sõltub peale pingestabiilsuse veel majanduslik efektiivsus. Suutes vähendada elektrivõrgu liinides või alajaamades tekkivaid energiakadusid on võimalik tõsta elektrisüsteemi haldajate ja tarbijate kasumit [1]. Sedamööda saab teoreetiliselt suurendada üleüldist energiasüsteemi otstarbekat toimist.

Pinge väärtuse säilitamine elektriühendustes on aga keeruline protsess, kuna energiasüsteemi kaudu toidetakse mitmeid tarbijaid ehk tagatakse nende energiakoormuse nõuded. Samuti saadetakse võrku elektrienergiat erinevate generaatorite poolt. Nõnda varieerub reaktiivvõimsuse liikumine elektrisüsteemis ja seetõttu muutub ühtlasi pinge sõlmpunktides. Lisaks võib mainida, et

reaktiivvõimsust ei ole otstarbekas ega osaliselt võimalik üle kanda pikemate vahemaade taha. Kokkuvõtlikult osutuvad õiged pinge ja reaktiivvõimsuste kontrollimise meetodid ning lahendused küllaltki olulisteks energiasüsteemide optimaalse töökorra saavutamisel [3]. Muuhulgas on vajalik veel teada, millised seadmed elektrivõrgus genereerivad või vajavad ehk tarbivad reaktiivenergiat ja kui suurtes kogustes seda tehakse.

Elektrisüsteemis tarbivad ja toodavad reaktiivvõimsust järgnevad elemendid [2]:

- Sünkroongeneraatorid, mille ergutusmähistele antavate käsklustega määratakse nende reaktiivvõimsuse tarbimine või tootmine. Juhul, kui on tegemist üleergutusega, siis generaator saadab reaktiivvõimsust elektrivõrku. Alaergutuse korral võtab masin reaktiivvõimsust sellega ühendatud elektriliinide kaudu üldisest energiasüsteemist. Arusaadavalt sõltub vastavate generaatorite poolt toodetava reaktiivvõimsuse ulatus seadmetele ja mähistele lubatavast voolude suurusest ning samuti kuumenemise taluvusest. Tavapäraselt on need masinad varustatud automaatse pingeregulaatoriga, mis hoiab selle klemmipinget ja ühtlasi sedamööda sisemiste voolude suuruseid lubatud piirides;
- Õhuliinid, sõltuvalt nende kaudu edastavatest koormusvooludest, tarbivad või genereerivad reaktiivvõimsust. Olukorras, milles mõne liini koormusevood on suhteliselt madalad, toodetakse elektrivõrku reaktiivvõimsust, samas, suuremate koormuste korral tekivad aga reaktiivvõimsuskaod;
- Maa-alused kaabelliinid lähtudes nende kõrgest mahtuvusest genereerivad peaaegu enamikes situatsioonides reaktiivvõimsust;
- Trafod tänu oma suurele induktiivsusele tarbivad reaktiivvõimsust;
- Tarbijate koormused eeldatakse üldjuhtudel tarbivat reaktiivvõimsust. Lähtudes sellest, et need on ühildatud alajaamade või mõne teise elektrivõrgu sõlme kohta, siis suure tõenäosusega osutuvad konstrueeritud koormuskarakteristikud sisaldavat nõutavat reaktiivvõimsust. Sõltuvalt aastaajast, ilmastikust ja kellaajast võivad vastavad koormuskarakteristikud märgatavalt muutuda. Nõnda kaasnevad sellega suuremad pinge muutused võrgusõlmedes ja sedamööda tekivad energiakadude tõusud;
- Kompenseerimisseadmed suurendavad või vähendavad nendega ühenduvates sõlmedes olevat pinge väärtust ehk tarbivad või toodavad reaktiivvõimsust. Erinevad reaktorid langetavad reaktiivvõimsuse hulka ja sedamööda madaldavad pinge suurust. Samas, kondensaatorid võimaldavad reaktiivvõimsust juurde genereerida ja seetõttu ostutavad

vajalikeks olukordades, milles mõnedes elektrivõrgu sõlmedes langeb pinge lubatust allapoole.

Pinge suuruste paiknemine lubatud piirvahemikes tagatakse seega reaktiivvõimsuse tootmise, tarbimise ja selle elektrisüsteemi ühendustes kulgemise kontrollimisega. Üldjoontes pakuvad esmast pingereguleerimise võimekust generaatorid tänu nende ergutuste muutmisele. Samas, suuremates elektrivõrkudes vajatakse veel täiendavaid meetmeid pinge suuremate kõrvalekallete vältimise eesmärgil. Ennekõike mõeldakse viimaste all mitmesuguseid kompenseerimisseadmeid nagu reaktorid ja STATCOM. Muuhulgas on pinget võimalik tõsta või alandada trafodes asetsevate astmelülitite kaudu. [3]

1.2 Sünkroongeneraatorite ergutussüsteem

Sünkroongeneraatorid on elektrijaamades peamised elektrienergia tootmise allikad. Muuhulgas saab neid kasutada reaktiivvõimsuse ja pinge reguleerimisel. Sealjuures vajavad vastavad seadmed ühendusvõrgu stabiilset toimimist ja sellest tulenevat sünkronismi ning sobivate klemmpingete olemasolu.

Tavapärase sünkroongeneraator koosneb staatorist ja rootorist, mille vahel asetseb õhkvaheki. Rootorimähistes liikuv elektrivool tekitab mainitu ümber magnetvälja, mis indutseerib vahelduvvoolu staatorimähistes. Juhul, kui on tegemist võrdeliste kolme faasi vooludega, tekib õhkvaheki magnetväli, mis pöörleb sünkroonkiirusega. Seega, stabiilse töömomendi hoidmise jaoks peavad staatori ja rootori magnetväljade pöörlemissagedused ühtima. [4]

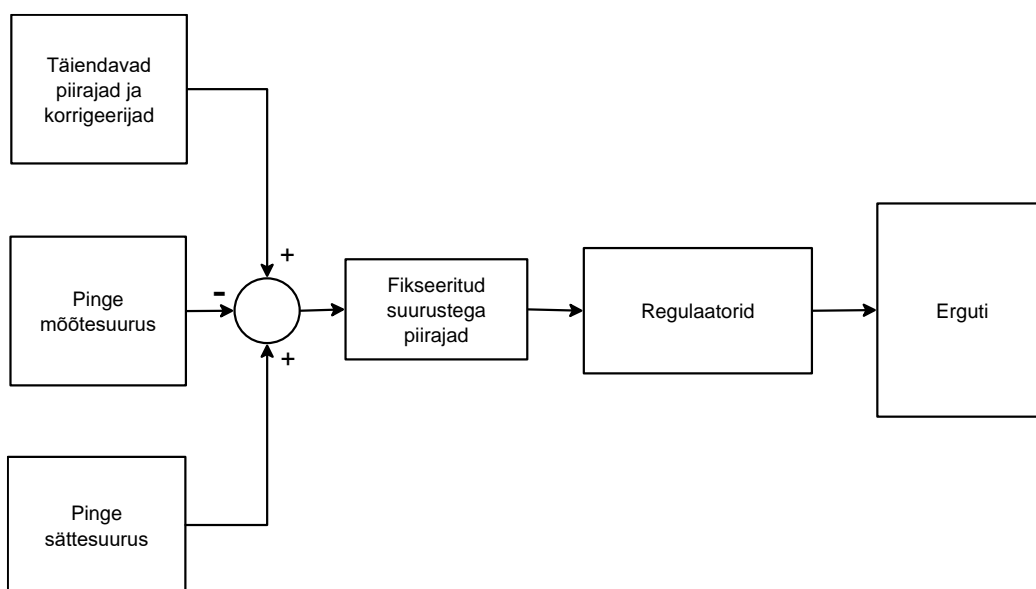
Ergutussüsteemi peamine eesmärk on anda alalisvoolu rootorimähistele. Lisaks võimaldab see kontrollida ehk reguleerida mähiste pinge suurust. Nõnda on tegemist teatud mõttes terve elektrisüsteemi stabiilsuse hoidjaga ja kaitsefunktsiooniga. Muuhulgas saab läbi ergutussüsteemi vältida generaatorite sisemiste voolude või energiahulkade tõuse üle normipiiride. [2]

Üheks ergutussüsteemile peale pandud põhinõudeks on edastada ja automaatselt reguleerida rootorimähiste voolu niimoodi, et säiliks ettemääratud generaatori klemmpinge või selle asetsemine lubatavas vahemikus. Seda juhtudel, milles generaatori poolt toodetav aktiivvõimsus muutub ning kasvab või kahaneb sellega ühendatus sõlmes mõõdetav reaktiivvõimsus. [5] Põhimõtteliselt on nõnda tegemist automaatse pingeregulaatoriga. Lisaks peab ergutussüsteem vastu pidama generaatoris tekkivatele või sellele mõjuvatele siirdeprotsessidele. Muuhulgas osutub küllaltki oluliseks veel mainitu toimimise kiirus, et suudetaks piisavalt koheselt reageerida elektrivõrgus tekkivatele muutustele [2].

Tavapärase ergutussüsteem koosneb järgnevatest osadest [4]:

- Erguti, mis edastab rootorimähistele alalis- või vahelduvvoolu;
- Regulaator, mille kaudu töödeldakse ja tõstetakse ergutussüsteemi sisenevad väärtuseid. Muuhulgas sisalduvad selles nii reguleerimis- kui ka stabiliseerimisfunktsioonid;
- Klemmpinge mõõtur, millega võrreldakse olemasolevat pinget eelseadistatuga. Samuti võib see võtta arvesse täiendavaid muutujaid nagu koormuse kompenseerimise vajalikkust;
- Energiasüsteemi stabiliseerija ehk sisend vähendamaks generaatorite võnkumisi;
- Erinevad piirajad ja kaitselülid, millede kaudu tagatakse generaatori mähiste voolude, klemmpinge ning sagedusomaduste asetsemise lubatud piirides.

Edasisel joonisel 1.1 on esitatud üldistav ergutussüsteemi ülesehitus.



Joonis 1.1. Generaatori ergutussüsteemi põhimõtteskeem

Olulisemad nendest piirajatest ja kaitselülidest on ennekõike sellised, mis ei lase generaatoril sisemiselt kuumeneda ja seetõttu kahjustada mähiseid ning isolatsiooni. Samuti on vajalik vältida seadme klemmpinge tõusu olukorrani, milles see ületab generaatorile lubatud pinget ülempiiri ja toob endaga kaasa võimalikud isolatsiooni tõrked. Lisaks tähendab kasvanud generaatori pinget ühtlasi ka sama sõlme küljes olevate tarbijate või muude elementide pinget suurenemist ja seetõttu väheneb nendel efektiivne elektrienergia rakendamine [6]. Teisest küljest osutuvad tähtsaks veel alaergutus- ja alapinge piirajad, kuna esimese korral suureneb jällegi generaatori mähistes vool. Madalama pinget suuruse korral võib lõpptulemusena lülitada välja terve alajaam või elektrisüsteemi piirkond [3].

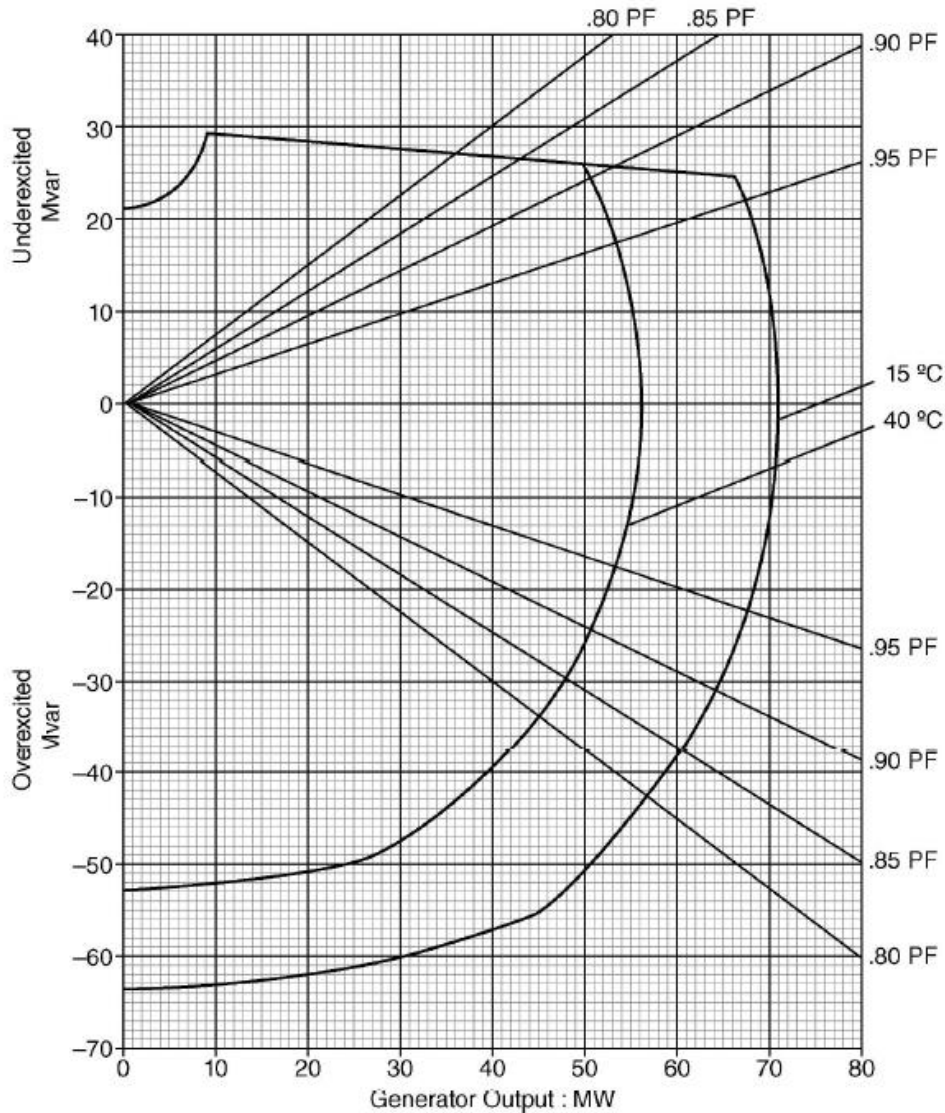
Generaatori ergutussüsteeme esineb mitmeid erinevaid ja nende ülesehitus varieerub sõltuvalt ergutusvoolu parameetritest, reageerimiskiirusest või sisemiste komponentide nagu integraatorite ja diferentsiaalülide omavahelisest järjestusest. Üldjoontes on nendes mitmed erineva tasemega tagasisidestatud ahelad, mis stabiliseerivad kindlaid lülisid [5]. Nõnda on saavutatav kogu seadme sujuv reguleerimine ja pikemaajaline stabiilne tööpunkt.

Teatud mõttes sõltub nende tüüp ka generaatori tootmise ajast ja ettevõttest. Põhilised ergutussüsteemide tähised on DC1A, AC1A, AC4A, ST1A ja ST2A [2]. Mainitute peamine erinevus sõltub näitena ergutis alalis- või vahelduvvoolu ning kaugemate toitepinge allikate kasutamises. Samuti reageerivad teatud ergutussüsteemid muutustele kiiremini ning võivad omada mitmesuguseid pooljuhtkomponente.

1.3 Reaktiivvõimsuse regulaator

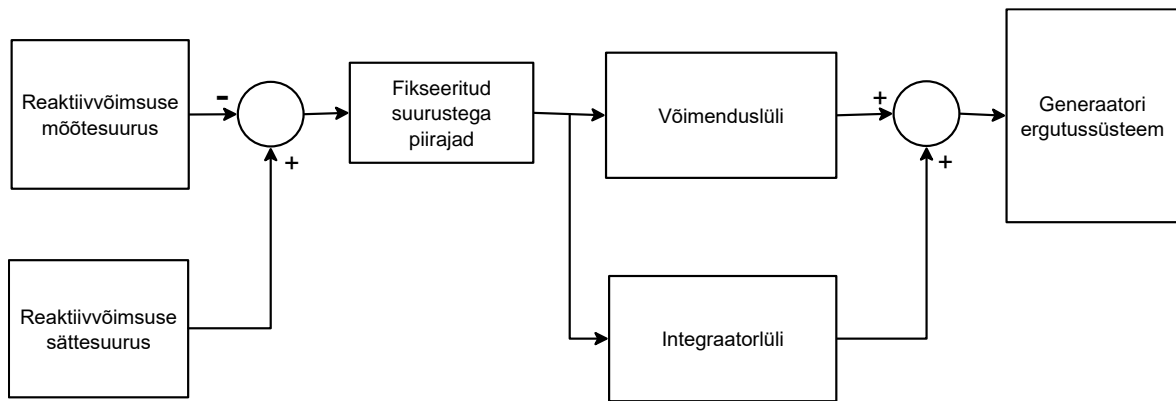
Generaatorite ergutussüsteemide kaudu on seega võimalik peale pinget veel reguleerida seadme reaktiivvõimsuse tootlust. Täpsemalt läheb selleks vaja reaktiivvõimsuse- ehk VAR-regulaatorit, millega reguleeritakse automaatselt generaatorite poolt toodetavat või tarbitavat reaktiivvõimsuse kogust. Teatud osas on see võrreldav automaatse pingeregulaatoriga. [7] Muuhulgas tuleb mainida, et olukorras, milles seadmega ühenduvas sõlmes langeb pinget väärtus tavapärasest madalamale või tõuseb kõrgemale, võivad aga rakenduda ergutussüsteemis paiknevad või selle juurde kuuluvad piirajad ja hoida reaktiivvõimsuse genereerimist teatud suuruste juures. Nõnda teistpidi sõnastades minnakse ümber pingeregulaatori ehk sedamööda ka reaktiivvõimsuse regulaatori väljunditest.

Suurus, kui palju teatud generaator on võimeline reaktiivenergiat tootma või tarbima, sõltub ennekõike vastava seadme karakteristikutest ehk PQ-kõveratest [4]. Täpsemalt öeldes pannakse paika iga aktiivvõimsuse ühikule vastav maksimaalselt lubatud genereeritav või tarbitav reaktiivvõimsuse kogus. Seda ületades tuleb arvestada isolatsiooni kuumenemisega, mis lõpptulemusena viib seadme kasutuskõlbmatuks muutumiseni. Siinkohal on need karakteristikud tootjate ja seadmete vahel erinevad, olles kord funktsiooni mõistes kumeramad või teatud vahemikus peaaegu lineaarsed. Üldiselt on soovitatav vältida generaatorite reaktiivvõimsuse tarbimise või tootmise koguse hoidmist PQ-kõveral asetsevate väärtuste lähedal, kuna siis on suurem tõenäosus, et vastav seade peale elektrivõrgus toimuvate järsumate protsesside ületab lubatavat reaktiivvõimsuse piirsuurust. Illustreerivalt on joonisel 1.2 ära toodud ühe võimaliku PQ-kõvera kuju.



Joonis 1.2. Generaatori PQ-kõver (horisontaalteljel on generaatori väljastatav aktiivvõimsus ja vertikaalteljel on generaatori reaktiivvõimsuse kogus sõltuvalt ergutussüsteemi edastatavatest käsklustest. Samuti on määravad veel temperatuuri ja võimsusteguri jooned) [4]

Iseenesest on reaktiivvõimsuse regulaatorina tegemist PI-lüluga, mille väljund muutub niikaua, kuni on saavutatud vajaminev genereeritav suurus, mida generaator peab hoidma kuni järgneva reaktiivvõimsuse muutuseni. Mainitud regulaatoris on seega tegemist tagasisidestatud ahelaga [8]. Põhimõtteliselt muudetakse vastava regulaatori sätte- ehk võrreldavat väärtust. Näitena määrates selleks arvulise suuruse viis Mvar, üritab generaator toota võimaluse korral pidevalt mainitud koguses reaktiivvõimsust. Arusaadavalt muutuvad tavapäraselt seadmega ühenduvas elektrivõrgus pidevalt koormused ja teised tingimused ning seda aeg-ajalt laiaulatuslikumalt. Nõnda osutub vajalikuks üldjuhtudel alati reguleerida reaktiivvõimsust vastava PI-lüli kaudu ehk pidevalt muuta sätteväärtust. Järgneval joonisel 1.3 on reaktiivvõimsuse regulaatori ülevaade



Joonis 1.3. Generaatori VAR-regulaatori põhimõtteskeem

Vanematel generaatoritel võib toimuda reaktiivvõimsuse ehk põhimõtteliselt ergutussüsteemi juhtimine hoopis käsitsi pööratava reostaadi kaudu. Säärane lahendus välistab aga erinevate automaatsete generaatorite reaktiivvõimsuse reguleerimismeetodite kasutamise. Lisaks tekitab mainitu võimalikke takistusi elektrijaama või elektrisüsteemi pingestabiilsuse tagamisel. [3] VAR-regulaatorist liigub saadud informatsioon ehk teatud arvuline suurus omakorda seadme ergutile, millega realselt tõstetakse või langetatakse generaatorist väljuvat reaktiivvõimsust. Teiste sõnadega öeldes lisatakse ergutussüsteemi täiendav sisend juba olemasolevate stabilisaatorite ja piirajate ning kaitselülide ühenduste juurde. Selle kaudu edastatakse pidevalt mingisugust arvulist väärtust ja takistatakse generaatorit hoidmast konkreetset etteseadistatud klemmi- või muu võrreldava pingesuurust. [3]

Üldjoontes on vastav arvuline suurus küllaltki madal, jäädes väärtuse null ümbrusesse. Samuti tähendab saadetava mõne protsendine muutus näitena generaatori poolt ühe M_{var} reaktiivvõimsuse juurde genereerimist või tarbimist. Viimane sõltub muidugi vastava seadme niminäivvõimsusest ja kasutatavast ergutussüsteemist. Nõnda osutub küllaltki oluliseks, et suudetakse VAR-regulaatoris olevate komponentide nagu võimendus- ja integraatorlülide parameetrid valida suhteliselt sobivad. [9] Lisaks tasub kasutada veel reaktiivvõimsuse regulaatori sees asetsevas integraatoris ning selle üleüldise väljundi ees fikseeritud arvulise suurusega piirajaid. Viimased ei lase lubatavatest kõrgemaid või madalamaid väärtuseid läbi ja sedamööda suudetakse tagada generaatori sujuv reguleerimine. Integraatoris paiknevate piirajate eesmärk on välistada aga selle elemendi summeeriv toime üle vajaminevate arvuliste suuruste. Vastasel korral võib näitena reguleerimissuuruse vähendamisel toimuda teatud ajaline viivitus, mille jooksul integraator oma väljastavat summat langetab kasutatavasse vahemikku. [8] Kokkuvõtlikult on vajalik ühildada kõik reaktiivvõimsuse regulaatoris olevate elementide ja piirajate parameetrid, et tagada selle eesmärgipõhine toimimine. Muuhulgas on tavapärane lisada veel üks piiraja ka mõõdetava reaktiivvõimsuse ja võrreldava sätevärtuse summalüli taha vältimaks elektrivõrgus toimivate

järsumate pinge- või koormusmuutuste tagajärjel VAR-regulaatori ootuspärasest äkilisemat reageeringut. Olukorras, milles ergutussüsteemi edastatakse kiiresti muutuvaid ja eelnevalt väljaselgitatust suuremaid arvulisi suuruseid, võib säärase tegevuse tulemusena generaatori reaktiivvõimsuse tootmine või tarbimine hüppeliselt muutuda. Lõpptulemusena rakenduvad kas reaktiivvõimsuse genereerimise piirajad, muuhulgas pinge väga kõrge tõusu või langemise peale, ning teoreetiliselt väljub mainitud situatsiooni jätkumisel generaator sünkroontalitlusest.

Tasub veel mainida, et erinevad ergutussüsteemid reageerivad omamoodi neile edastatavatele sisenditele. Ennekõike määravad selle ära nende seesmiste lülide parameetrid ja nõnda tuleb iga generaatori jaoks seadistada vastavalt ka reaktiivvõimsuse regulaatorid. Seda näitena saadetava väljundi arvulise suuruse kui ka üldise integraatori muutumiskiiruse osas. Lisaks peab arvestama, et VAR-regulaator võiks olla oma toimimises aeglasem kui ergutussüsteem. [6] Säärane ülesehitus võimaldab tagada stabiilsema generaatori reageeringu. Samas, reaalselt võib osutada suhteliselt keerukaks sobitada omavahel VAR-regulaator ja vähem kiire ergutussüsteem ning seetõttu tekivad generaatori reaktiivvõimsuse reguleerimisel iseäralikud sumbuvad ülevõnkumised hoitava ehk sätteväärtusena paika pandud reaktiivvõimsuse suuruse ümber.

1.4 Reaktiivvõimsuse reguleerimise majanduslik aspekt

Peale elektrivõrgu stabiilsuse tagamise ja normidele vastavate klemmi- või sõlme pingete saavutamisele osutub mõistlikuks reguleerida reaktiivvõimsust veel majanduslikest eesmärkidest lähtudes. Põhimõtteliselt jaotub see järgnevasse üldistesse suundadesse [10]:

- Vajadus langetada elektriühendustes ja selle elementides tekkivaid energiakadusid;
- Optimeerida elektrivõrgu ühenduste läbilaskevõimet;
- Vähendada põhivõrguga seonduvas liitumispunktis mõõdetavat reaktiivvõimsust.

Energiakadude madaldamine elektriühendustes on olnud aktuaalne teema juba aastakümneid. Otseselt saab sellele läheneda kahel võimalusel. Esmalt tähendab ühendusliinides ülekantav reaktiivvõimsus omakorda ka suurenevat võimsuskadu. Säärast olukorda on parendatud näitena koormusvoogude ümbersuunamise või üleüldise võrgukonfiguratsiooni muutmistega [10]. Nõnda osutub suhteliselt reaalseks saavutada piisavalt optimaalsed koormusvoolud elektriliinides. Samas, pidevalt muutuvad tarbijate koormusgraafikud ja elektrijaamade poolt võrku genereeritavad võimsused tekitavad järjekordseid kõrvalekaldeid eelnevalt kirjeldatud tulemuse efektiivsuses. Muuhulgas tasub veelkord mainida, et ka alakoormatud elektriliinid genereerivad omakorda reaktiivvõimsust ja suurendavad sedamööda energiakadusid. Teine lahendus on üritada vältida reaktiivvõimsuse ülekandmist pikkade vahemaade taha. Lisaks tekib teoreetiliselt teatud liini

pikkuse ja reaktiivvõimsuse koguse omavahelisest suhtest lõplik piirväärtus, millest enam kaugemale pole vastavat energiat mõistlik või üldse võimalik edastada [7]. Nõnda osutub kasumlikumaks ja elektrisüsteemi haldaja seisukohast efektiivsemaks toota ja tarbida reaktiivvõimsust teatud tarbijate ligiduses asetsevates alajamades ning olulisemates ja problemaatilisemates sõlmpunktides. Viimane ikkagi situatsioonides, milles pinge arvuline väärtus tõuseb või langeb lubatust piirvahemikest väljapoole. Kokkuvõtlikult suudetakse nõnda vähendada ühendusliinides liikuvat reaktiivvõimsuse hulka ja sedamööda ka kaasnevat energiakadu [7], [11].

Teistpidiselt tähendab jällegi säärane kohapealne reaktiivvõimsuse kompenseerimine ja pinge reguleerimine vajalike seadmete paigaldamist. Nõnda osutub olulisena teha kindlaks, kas alati on kõige otstarbekam vältida elektriliinide kaudu reaktiivvõimsuse edastamist ja näitena rakendada alajaamades kondensaatoreid. Tõenäoliselt siiski pinge suurte kõikumiste korral sellest valikust mööda ei pääse [12]. Üldjoontes leiavad samalaadsed energiakadude vähendamise üle toimuvad arutlused aset veel elektrijaamades. Ühest küljest puuduvad nendes pikemad ühendusliinid võrreldes elektrivõrguga ja seetõttu ei osutu tekkivad võimsuskadud suhteliselt kõrgeteks. Samas on näitena võimalik toota kohapealsetele elektrijaama sisestele tarbijatele nagu erinevad mootorid, vahetrafod ja sarnased vajaminevat reaktiivvõimsust. Lisaks asetsevad tavapärasel elektrijaamas ikkagi generaatorid ja nõnda saab rakendada mainitud eesmärgi saavutamisel nende juurde konstrueeritud VAR-regulaatoreid. Põhimõtteliselt tähendab see kohapeal ehk objekti raames reaktiivvõimsuse tootmist ja selle tarbimist ning seda juba olemasolevate seadmetega.

Traditsioonilistes elektrijaamades paiknevad üldiselt generaatorid ja omatarve ehk mitmesugused reaktiivenergia tarbijad ühtses pingeklassis, milleks on enamasti keskpinge. Samuti kinnituvad nende ühendusliinid tõenäoliselt sama jaotla lattidele või sektsioonide külge. [13] Nõnda liigub genereeritav ja vajatav reaktiivvõimsus illustreerivalt ainult jaotla piirides. Teoreetiliselt oleks võimalik kogu generaatorite poolt toodetav reaktiivvõimsus koheselt ja reaajas tarbijate poolt ära ammendada. Olukorras, milles teatud tarbija enesepoolset genereerib reaktiivvõimsust ja seda rohkem ülejäänud tarbijate vajadustest, saab generaatorite kaudu vastava koguse elektrivõrgust eemaldada. Reaalsuses tekivad ikkagi reaktiivvõimsuskadud ühenduskaablites ja trafodes ning seega on vajalik generaatoritel toota reaktiivvõimsust rohkem kui tarbijatel vaja läheb. Samuti on mainitud energiakaod sõltuvuses pinge arvulisest suurusest ja võivad muutuda suhteliselt palju.

Lähtuvalt sellest, et elektrijaamad toodavad üldisesse elektrisüsteemi aktiivenergiat ja toetavad sedamööda sageduse stabiilsena püsimist, on nende kahe struktuuri vahel teatud ühenduspunkt ehk teiste sõnadega öeldes liitumispunkt. Sedamööda asetsevad elektrijaamades ka jõutrafod, mis tõstavad generaatorite klemmipinget teisele sobilikule väärtusele nagu 20 või 110 kV. Viimane

suurus on tavapärase suurematel elektrienergia tootjatel, mis ühenduvad otse põhivõrgu ehk suurema elektrisüsteemi külge. Mainitud trafod vajavad ise oma magnetahelate ülesehitamiseks ja normaalseks toimimiseks reaktiivenergiat. Juhul, kui generaatorite ergutusüsteeme ei juhita reaktiivvõimsuse reguleerimise eesmärgil, tuleb neile oluline reaktiivvõimsus hankida suuremast elektrisüsteemist sarnaselt tarbijatele saadetavaga. Kokkuvõtlikult tekib liitumispunktis reaktiivvõimsuse vahetus, mis võib olla põhivõrgu haldaja poolt maksustatud.

Eestis on põhivõrgu omanik Elering AS seda niimoodi sätestanud ja nõnda tuleb kõigil liitujatel, millede ühenduspunktide pingeaste on üle suuruse 1000 V, tasuda vastavasse võrku saadetava ja sellest võrgust võetava reaktiivenergia eest [14], [15]. Põhimõtteliselt tähendab see suurema elektrisüsteemi külge liitujale täiendavate ressursside kaasamist. Nõnda näib olevat elektrijaamadel küllatki mõistlik vähendada ehk minimeerida liitumispunkti kaudu vahendatava reaktiivvõimsuse koguseid. Eriti võttes arvesse nende teoreetilist võimekust ja seadmeid, et seda saavutada. Teisest küljest tuleb elektrijaamadel olla üheks osapooleks tagamaks pingestabiilsus sellega ühenduses olevas alajaamas ehk võrgusõlmes. Teoreetiliselt saab põhivõrgu haldaja sätestada teatud reaktiivvõimsuse kogused, mida elektrijaam peab kas tootma või tarbima, soovides säilitada normide piiridele vastav pinge arvuline suurus [14]. Ainuüksi seetõttu vajavad generaatorid reaktiivvõimsuse regulaatorit ja seda eelistavalt automaatse reguleerimisvõimekusega.

Nõnda pannes ühtekokku generaatoritega reaktiivvõimsuse juhtimise, võrgukadude vähendamise, liitumispunktis mõõdetava reaktiivvõimsuse koguse ja täiendavad põhivõrgu nõuded osutub mõistlikuks kasutada VAR-regulaatoritega generaatoreid elektrijaama üldise efektiivsuse tõstmise, sisemise tarbimise reaktiivvõimsuse vajaduste katmise ning teatud olukordades veel suurema elektrisüsteemi jaoks. Peamiselt võib siiski esile tõsta ennekõike liitumispunkti kaudu vahendatava reaktiivvõimsuse langetamise, kuna elektrijaama sisesed ühendusliinid on ikkagi lüheldased ja seetõttu on nendes tekkivad energiakaod pigem teisejärgulised. Viimaste alanemine realiseeritakse tõenäoliselt koos üldises elektrijaamas liikuvate reaktiivvõimsusvoogude efektiivsemaks muutmise toel. Olukorras, milles teatud elektrijaamas asetsevad mitmed generaatorid ja need on näitena erinevad, tuleb paika panna veel nende reguleerimisjärjekord [16]. Nõnda on saavutatav ka suurem liinikadude langus ning saab minimeerida hoopis näitena generaatorite karakteristikutel põhinevaid muutujaid. VAR-regulaatorid võivad sealjuures ise olla käsitsi reguleeritavad, kuid piisavalt optimaalse toimise jaoks peaks kiirelt muutuma nende sätteväärtused, mille järgi hoitakse reaktiivvõimsuse suurus. Viimane võimaldab paremat reageeringut tarbijate muutuvale koormuskarakteristikule ja tõstab energiakadude minimeerimise ulatust.

2. GENERAATORITE REAKTIIVVÕIMSUSE JUHTIMISE METOODIKAD

2.1 Generaatorite eristamine meetodid

Olukorras, milles on vajalik generaatori või generaatorite, aga ka asünkroonmootorite reaktiivvõimsust suurendada või vähendada ning seda soovitakse teha piisavalt optimaalselt ja koordineeritult, tuleb üldjuhtudel rakendada kindlaid meetodeid ning lähtuda vajalikest eesmärkidest, milleks on ootuspärased mõõteväärtused, ning mitmesugustest piirangutest. Käesolevas peatükis vaadeldakse ja analüüsitakse ennekõike mitme reaktiivvõimsust genereeriva seadme, edaspidi ikkagi sünkroongeneraatori, vahel toodetavate ja tarbitavate reaktiivvõimsuste jaotamise võimalikke ratsionaalsemaid versioone ning nende omavahelist erinevust. Lisaks peatutakse ka alternatiivsematel valikutel ning põhjendatakse nende kõrvalejätmise otsuseid. Olulisemad reaktiivvõimsuse jaotamise meetodid, mida edaspidiselt käsitletakse on võrdeline, proportsionaalselt aktiivvõimsuse järgi, proportsionaalselt reaktiivvõimsuse limiidi järgi, järjestikkuline, ühendusliini aktiivvõimsuskao mõõteväärtuse järgi ja ühendusliini aktiivvõimsuskao suhtelise juurdekasvu järgi.

Samuti sätestatakse generaatoritega reaktiivvõimsuste reguleerimise peaesmärgi olemus, milleks on põhivõrguga seonduvas liitumispunktis reaktiivvõimsuse vahetuse minimeerimine ja generaatorite eristamisega kaasnev võimsuskadude võimalik alandamine. Peatüki teises pooles tõstetakse esile reaktiivvõimsuste juhtimise regulaatori jaoks vajaminevate sisendväärtuste olemus ja nende saamine. Seejärel vaadeldakse, kuidas on võimalik muuta ühe generaatori reaktiivvõimsust ilma teisi reguleerimata ning arutletakse mõningate säärate ülesehituslike versioonide üle. Kokkuvõtlikud resultaadid lõplikult valitud reaktiivvõimsuse jaotamise meetodite efektiivsuse ja peaesmärgi saavutamise kohta on nähtavad peatükis 3.5. Sellele eelneb nende saamisel rakendatud üldise generaatorite reaktiivvõimsuste juhtimissüsteemi kirjeldus.

Juhul, kui vaadeldavas elektrivõrgus on tegemist ainult ühe generaatoriga, siis selle ergutussüsteemi juhtimiseks pole otseselt vaja teisi samalaadseid seadmeid arvestavaid määrajaid või piiranguid. Täpsemalt öeldes piisab ainult reguleeritava generaatori VAR-regulaatori juhtimisest ning selle kaudu üritatakse saavutada reaktiivvõimsusega seonduvate objektisestest eesmärkide täitmine nagu liitumispunktis mõõdetava väärtuse või ühendustes tekkivate energiakadude minimeerimine [17]. Nõnda tuleb kindlaks teha, millist elektriijaama parameetrit või sellega kaasnevat situatsiooni optimeeritakse ja sedamööda reguleerida juhitava generaatori ergutussüsteemi. Põhimõtteliselt osutuvad siinkohal peamisteks määravateks piiranguteks just generaatori minimaalne ja maksimaalne võimalik PQ-kõveratele tuginev reaktiivvõimsuse tootlikus.

Sedamööda võib osutada suuremate tarbijate koormuste korral keeruliseks täita nende nõudlust vajamineva reaktiivvõimsusega ning sellest tulenevalt väheneb energiakadude ja näitena põhivõrguga ühenduspunktis mõõdetava reaktiivvõimsuse vahetuskoguste minimeerimise efektiivsus. Viimasena mainitud saab esitada üldise avaldisega 2.1, millele rakendamist piiravad täiendavad avaldised 2.2...2.4.

$$\min \left(\sum_{i=1}^m Q_{Ti} \right) \quad (2.1)$$

$$\text{lisingimustel} \quad U_{\min} < U_{Gj} < U_{\max} \quad ,j = 1 \dots n \quad (2.2)$$

$$Q_{Gj(\text{tubatud min})} < Q_{Gj} < Q_{Gj(\text{tubatud max})} \quad ,j = 1 \dots n \quad (2.3)$$

$$Q_{Gj} \geq Q_T + Q_K \quad ,j = 1 \dots n \quad (2.4)$$

kus Q_T on trafode kaudu edastatav reaktiivvõimsus, Mvar,

U_G on pinge generaatori klemmidel või ühenduslatil, kV,

Q_G on generaatorite poolt toodetav reaktiivvõimsus, mis sõltub nende seadmete PQ-karakteristikutest, Mvar,

n on reguleeritavate generaatorite arv,

Q_T on tarbijate reaktiivkoormus, Mvar,

Q_K on reaktiivvõimsuskadu ühendusliinides, Mvar.

Olukorras, milles elektrijaamas on korraga töös mitmed generaatorid ja nende poolt toodetavat reaktiivvõimsust peetakse vajalikuks reguleerida või optimeerida, tuleb kasutada juba täiendavat regulaatorit. Ennekõike on säärase lüli peaeesmärk sõltuvalt eelistustest või seadetest tõsta ning langetada kõikide generaatorite reaktiivenergiat kas võrdeliselt, teatud erinevusi nagu liinitakistusi arvesse võttes või mõningate teiste aluste järgi lähtudes. Viimased võivad olla näitena kas või generaatorite või ka nendega ühenduvate turbiinide kütuse- ja marginaalkulude karakteristikud.

Samas võib osutada keerulisema poolseks siduda omavahel generaatorite karakteristikutel põhinevad parameetrid turbiinide soojuslike näitajatega. Esimesed kirjeldatutest on kiiresti muutuvad ehk elektrilistel protsessidel põhinevad, teised aga sõltuvad aeglasematest temperatuuri ja rõhu näitajate vähenemistest või suurenemistest. Üldistades tähendab nimetatute ühtne arvestamine juba terve elektrijaama energiasüsteemide kompleksset juhtimist ja optimeerimist,

mis on esmaselt ressursi nõudev tegevus ja ei oma alati teatud eesmärkide saavutamise juures peamist tähtsust. [18], [19]

2.1.1 Reaktiivvõimsuse jaotamine võrdeliselt

Generaatorite reaktiivenergiat võrdeliselt vähendades või suurendades jagatakse kogu elektriijaama siseste tarbijate nõudlus ära kõigi VAR-regulaatorit omavate generaatorite vahel ning seda saab esitada avaldisega 2.5 ja lisatingimustega 2.6...2.8. Eeldusena võetakse, et vastavate generaatorite ergutussüsteeme on võimalik juhtida ühtselt. Juhul, kui mõned nendest on käsitsi reguleeritavad, väheneb sellest tulenevalt ka reaktiivvõimsuste reguleerimise kasutegur. Mainitud meetod on sobilik olukordades, milles pole otseselt oluline tugineda elektriijaama sisemistes ühendusliinides tekkivatele energiakadudele või erinevatele seadmete karakteristikutele. Ühe põhjusena säärase valiku tegemise juures saab esile tõsta väljatoodute madala osakaalu elektriijaama üleüldistes energiakadudes või nende omavahelises suhteliselt väikestes erineustes.

$$Q_{Gi} = \frac{\Delta Q_K}{n}, i = 1 \dots n \quad (2.5)$$

lisatingimustel
$$U_{min} < U_{Gj} < U_{max}, j = 1 \dots n \quad (2.6)$$

$$Q_{Gj(lubatud\ min)} < Q_{Gj} < Q_{Gj(lubatud\ max)}, j = 1 \dots n \quad (2.7)$$

$$Q_{Gj} \geq Q_T + Q_K, j = 1 \dots n \quad (2.8)$$

kus ΔQ_K on tarbijate reaktiivkoormuse muutus, Mvar.

Põhimõtteliselt tuleb kõigi reguleeritavate generaatorite reaktiivvõimsuste ühtsel ja võrdelisel muutmisel arvesse võtta nende reaktiivvõimsuse tootlikkuse piire ja elektrivõrguga ühenduses olemist ehk võimsuslülitite asendeid [20]. Juhul, kui elektriijaamas paiknevad mitmete erinevate niminäivvõimsustega generaatorid ja kõigi valikus olevate reaktiivvõimsust saab vajadusel automaatselt reguleerida, tekib sellest tulenevalt ja arusaadavalt situatsioon, milles väiksemate reaktiivvõimsuse genereerimiste piirväärtustega seadmed saavutavad vastavad suurused enne kui suuremad generaatorid. Sedamööda on oluline ühtse reguleerimise juures lisada teatud üksikuid generaatoreid välistavad olekud, mille saavutamise korral jäetakse generaator edasisest reaktiivvõimsuse reguleerimisest välja. Teisiti öelduna jätkavad reaktiivvõimsuse genereerimist veel selle jaoks võimekust omavad seadmed.

Elektriijaama sisemise tarbimise vähenemise või muudel põhjustel reaktiivenergia nõudluse langemisel alandatakse reaktiivvõimsuse tootmist samamoodi kõigi ühtse juhtimise alla kuuluvatel seadmetel võrdeliselt. Siinkohal on oluline, et võetakse arvesse erinevate generaatorite

väljastatavaid reaktiivvõimsuse suuruseid ja nende asetsemist PQ-kõvera piirväärtuste juures. Lähtudes eelnevalt kirjeldatud reaktiivvõimsuse tõstmise meetodist on nõnda vajalik esmaselt vähendada suurema niminäivvõimsusega generaatorite reaktiivvõimsust situatsioonini, milles kõigi ühtse reguleerimise alla kuuluvate vastavate seadmete reaktiivvõimsuse väljastamise suurus on võrdeline valikus oleva väikseima generaatori poolt toodetava reaktiivvõimsusega. Sedamööda on saab välistada olukorra, milles pidevalt muutuva tarbimise ja sellest tuleneva reaktiivvõimsuse reguleerimise käigus lõpptulemusena toodavad teatud generaatorid reaktiivvõimsust peaaegu piirväärtuse maksimumi lähedal või täpselt selle juures, teised aga teevad seda väga madalatel suurustel. Kokkuvõtlikult tekib sääraselt ebatasakaal masinate poolt edastavate reaktiivvõimsuste suhetes vastavate niminäivvõimsustega ja samuti veel omavahel.

Seetõttu vajab eelnevalt mainitud meetodi rakendamine täiendavasse regulaatorlülisse sisendeid, mis lisaks teabele teatud generaatori poolt toodetava reaktiivvõimsuse suuruse kohta võimaldab määrata selle asetsemist lubatud reaktiivvõimsuse genereerimise vahemikus ning selle ületamise korral piirab vastava seadme reguleerimist. Muuhulgas peab säärane üldisem juhtimissüsteem aru saama, millal on vajalik langetada just suuremate niminäivvõimsust omavate generaatorite reaktiivvõimsuse toodangut. Lisaks osutub oluliseks kogu olukorra ümberarvestamine situatsioonides, kui teatud generaatorit elektrivõrguga ühendava võimsuslüli olekut muudetakse ehk näitena lülitatakse see jaotla latistuse küljest lahti.

Seega, eelnevalt kirjeldatud meetodil reaktiivvõimsust reguleerides kaasneb teatud vaatenurgast lähenedes mitteotstarbekas resultaat. Nimelt tähendab tarbimise nõudluse täitmiseks vähendatava või suurendatava reaktiivvõimsuse koguse võrdeline jagamine reguleerimise hulka kuuluvatel generaatoritel seda, et mõned nendest toimivad suhteliselt reaktiivvõimsuse tootmise ülempiiri lähedal ja teised mitte. Nõnda vastav situatsioon vähendab muuhulgas ka elektrisüsteemi üldist stabiilsust, kuna võib tekkida olukord, milles enamiku generaatorite reaktiivvõimsuse väljastamine on maksimumväärtuse juures ja seetõttu puudub täiendav reserv näitena pingeprobleemide korral.

Mainitu välistamisel on üheks sobivaks lahenduseks piirata iga ühtse reguleerimise alla kuuluva generaatori reaktiivvõimsuse väljastamise kogus teatud suuruse juures võimalikust maksimumväärtusest. Näitena võib selleks olla tähis 70%. Põhimõtteliselt reguleerib sedamoodi üldine juhtimissüsteem kõigi reguleeritavate masinate reaktiivvõimsuse tootlikkust ikkagi võrdeliselt, kuid igal üksikul generaatoril lõpetatakse see vastava paika seadistatud väärtuse saavutamisel. Juhul, kui kõigil on jõudnud kätte vastav piirmäär, hakatakse nendel edasiselt vajaduse korral reaktiivvõimsust jällegi võrdeliselt tõstma. Nõnda tuleb üldisesse reaktiivvõimsuste juhtimise ülesehitusse lisada vastavad sisendid, mille kaudu saab paika määrata esmaselt lubatavad piirsuurused.

2.1.2 Reaktiivvõimsuse jaotamine proportsionaalselt

Teisest küljest võib mitmete generaatorite ergutussüsteeme reguleerida küll võrdeliselt, kuid hoopis proportsionaalselt, võttes arvesse ennekõike väljastatava reaktiivvõimsuse suhet vastava masina niminäivvõimsusega. Nõnda suurendatakse või vähendatakse erinevate generaatorite reaktiivvõimsust tulenevalt nende niminäivvõimsusest ehk lihtsamalt öeldes masinate suuruselt. Samuti võib kasutada niminäivvõimsuse asemel reaalselt toodetavat aktiivvõimsust, kuna see tõenäoliselt muutub ajaperioodis vähe ning näitab täpsemini iga generaatori reaalselt võimekust toota PQ-kõvera järgi reaktiivvõimsust. Näitena võib siinkohal tuua, et tarbimise koormuse kasvamisel tõstetakse käesoleva meetodi järgi ühe generaatori reaktiivvõimsust 25%, teise oma 30% ja ülejäänutel 40%. Kokkuvõtlikult peaksid need kõik generaatorid tootma reaktiivvõimsust võrdväärse koguse lubatavast piirväärtusest, eeldades et võimsustegur on vastavatel samasugune [21]. Kirjeldatud meetodit iseloomustab avaldis 2.9 ja lisatingimused 2.10...2.12.

$$Q_{G_i} = \Delta Q_K \cdot \frac{P_{G_i}}{\sum_{i=1}^n P_{G_i}}, i = 1 \dots n \quad (2.9)$$

lisatingimustel
$$U_{min} < U_{G_j} < U_{max} \quad , j = 1 \dots n \quad (2.10)$$

$$Q_{G_j(lubatud\ min)} < Q_{G_j} < Q_{G_j(lubatud\ max)} \quad , j = 1 \dots n \quad (2.11)$$

$$Q_{G_j} \geq Q_T + Q_K \quad , j = 1 \dots n \quad (2.11)$$

kus P_G on generaatorite poolt toodetav aktiivvõimsus, MW.

Sedamööda ei tooda sobivad generaatorid enam üksteisega samasuurt reaktiivvõimsuse suurust, välja arvatud olukordades, milles mõned nendest on piirväärtused saavutanud ja teised seetõttu võivad genereerida rohkem, vaid see jääb nüüd mainitutel ühtse protsendihulga juurde aktiiv- või niminäivvõimsusest sama võimsusteguri korral. Kokkuvõtlikult tähendab eelnev, et igal reguleerimise alla kuuluval masinal on proportsionaalselt võrdeline reguleerimisreserv [20], välja arvatud situatsioonides, milles tarbijate nõudlus jõuab kõigi võrguga ühenduvate generaatorite reaktiivvõimsuse väljastamise ülempiirini. Muuhulgas saab vastavat meetodit kasutada ka reaktiivvõimsuste vähendamise ehk generaatorite enda poolse tarbimise juures.

Samas, mõne suurema generaatori väljalülitumine või sellel toimuv olulisem väljastatava aktiivvõimsuse muutus toob kaasa, tuginedes PQ-kõverale, suurema reaktiivvõimsuse nõudluse teistelt seadmetelt. Seetõttu võivad proportsionaalse reaktiivvõimsuse jagamise meetodiga kaasnedes ulatuslikumad generaatorite reaktiivvõimsuste kõikumised ja isegi omavahelised võnkumised ehk teineteise tasakaalustamised, kui seda oleks lihtsalt reaktiivvõimsuse võrdeliselt

jagamisel. Ennekõike määrab väga palju ka elektriijaama koosseisu kuuluvate generaatorite üksteisest erinevused, seda nii niminäivõimsuse kui ergutussüsteemide ülesehituste ja reageerimiskiiruste poolest.

Lisaks saab proportsionaalselt generaatorite vahel reaktiivvõimsust reguleerida ka nendele lubatavaid reaktiivvõimsuste alam- ja ülempiire arvesse võttes, tuginedes avaldisele 2.13 ja lisatingimustele 2.15...2.17. Sedamööda lähtutakse just igal ajahetkel saada olevast maksimaalsest reaktiivvõimsusest, mitte lihtsalt aktiivvõimsuste kogusest. Sõltuvalt generaatorite PQ-karakteristikutest, võivad nendel samade aktiivvõimsuste korral olla erinevad maksimaalsed reaktiivvõimsuse limiidid, ning seetõttu seda teavet kaasates peaks suurenema reguleerimise efektiivsus [20]. Avaldis 2.14 võtab omakorda arvesse juba teatud generaatori poolt genereeritava reaktiivvõimsuse kogust.

$$Q_{G_i} = \Delta Q_K \cdot \frac{Q_{G(\text{limit})_i}}{\sum_{i=1}^n Q_{G(\text{limit})_i}}, i = 1 \dots n \quad (2.13)$$

$$Q_{G_i} = \Delta Q_K \cdot \frac{(Q_{G(\text{limit})_i} - Q_{G_i})}{\sum_{i=1}^n Q_{G(\text{limit})_i}}, i = 1 \dots n \quad (2.14)$$

lisatingimustel
$$U_{\min} < U_{G_j} < U_{\max}, j = 1 \dots n \quad (2.15)$$

$$Q_{G_j(\text{lubatud min})} < Q_{G_j} < Q_{G_j(\text{lubatud max})}, j = 1 \dots n \quad (2.16)$$

$$Q_{G_j} \geq Q_T + Q_K, j = 1 \dots n \quad (2.17)$$

Põhimõtteliselt jääb ka generaatorite VAR-regulaatorite ühtne juhtimissüsteem mõlema meetodi korral sarnaseks. Vaja on teada iga juhitava generaatori poolt hetkel toodetavat aktiiv- ja reaktiivvõimsuse suurust, määrata PQ-kõvera järgi ära lubatavad reaktiivvõimsuse alam- ja ülempiirid, vajadusel lähtuda mingisugustest täiendavatest piirangutest ning mõõta vastava seadme klemmi- või latipinget. Lisaks tuleb veel arvestada generaatorite võimsuslülitite asenditega ja muidugi liitumispunktis mõõdetavat reaktiivvõimsust, mille järgi üldine reguleerimine toimub. Teoreetiliselt osutuvad siinkohal takistavateks tingimusteks objektsisene tarbijate nõudlus, generaatorite eneste võimekus ja täiendavad nõuded suurema elektrisüsteemi haldaja poolt.

2.1.3 Reaktiivvõimsuse jaotamine järjestikuliselt

Muuhulgas võib veel mainida, et jättes kõrvale energiakaod ja erinevad karakteristikud, saab põhimõtteliselt generaatorite reaktiivvõimsust reguleerida ka järjestikuliselt. Ennekõike võiksid sääraselt juhitavad seadmed olla samaväärse võimekusega, kuid otseselt pole see määrav. Nõnda

otsustatakse ehk kinnitatakse üldises VAR-regulaatorite juhtimissüsteemis sätteolekutega valiku koosseisu kuuluvate generaatorite reguleerimise järjekord. Sedamööda rakendub kõigepealt näitena masin tähistusega G1 ja olles saavutanud lubatava reaktiivvõimsuse genereerimise ülempiiri, hakkab edasiselt reaktiivvõimsust tootma G2. Muuhulgas tugineb ka reaktiivvõimsuse alla reguleerimise järjekord samal ülesehitusel, ainult vastupidises järjekorras.

Lisaks peab vastava meetodi kasutamisel arvesse võtma mitmesuguseid situatsioone, mille korral teatud generaatorid on välja lülitatud ja sedasi tuleb üldises juhtimissüsteemis paika seadistada muutustele reageerivad ahelad. Teisest küljest tähendab eelnevalt kirjeldatu olukorda, milles üks või mitu generaatorit toodavad reaktiivvõimsust maksimaalse piirväärtuse lähedal, samas ülejäänutel aktiivvõimsust edastavatel seadmetel on vastav suurus suhteliselt madal või üldse olematu. Kokkuvõtlikult on tegemist pigem teatud vaatenurga järgi väheefektive, kuid kindlat eesmärki täitva lahendusega, nagu liitumispunktis reaktiivvõimsuse mõõdetava väärtuse minimaalseks saamine. Võimalik, et säärane generaatorite VAR-regulaatorite juhtimissüsteem osutub piisavaks teatud elektrijaama jaoks. Viimane sõltub ikkagi sellest, kas põhivõrguga vahetatava reaktiivvõimsuse minimeerimine on märgatavalt suurema tähendusega, kui generaatorite või liiniühenduste energiakadude alandamine ning elektrivõrgu stabiilsus.

2.1.4 Reaktiivvõimsuse jaotamise lisakriteeriumid

Siinkohal tasub veel täiendada, et tavapäraselt jääb põhivõrgu ja kindlat generaatorit või generaatoreid siduva jaotlalati vahele ainult üks ühendusliin. Sedamööda kas või liitumispunkti ja generaatorite jaotla vahelistes kaablites reaktiivvõimsuse vahetamise vähenemine langetab ühtlasi ka nendes tekkivaid energiakadusid, ja seetõttu omab märgitule teatud mõttes kaudset toimet [22]. Teisest küljest sisaldab eelnevalt mainitud lattide või ühenduspunktide vahemik peale kaablite veel trafot, mis iseenesest vajab efektiivseks toimimiseks reaktiivvõimsust. Juhul, kui liitumispunktis hoitakse vahetatava reaktiivvõimsuse kogus näitena väärtuse null lähedal või minimeeritakse seda mingisuguses ulatuses, peab trafo jaoks reaktiivenergia tulema elektrijaama generaatoritelt. Nõnda puudub ka otsene võimalus täielikult vähendada põhivõrgu ja vastava jaotla vahelisest ühendusest reaktiivkomponenti.

See võib olla rohkem realiseeritav situatsioonis, milles trafo jaoks vajaminev reaktiivvõimsus kandub läbi liitumispunkti ning generaatorid tagavad ainult tarbijate nõudluse. Samas, kõrgepingeastme jõutrafod on suhteliselt suure induktiivsusega ja viimati kirjeldatud olukorrast tulenevalt liiguks põhivõrgust elektrijaama arvestatav kogus reaktiivenergiat. Mainitu võib osutada kõrgema maksumusega olevaks, kui ühendusliinide energiakadu. Lisaks kasutavad veel näitena liinidel paiknevad lühisvoole piiravad reaktorid suhteliselt rohkelt reaktiivvõimsust. Sedamööda

peab kokkuvõtlikult ära otsustatama, kuivõrd määravad on energiakaod elektriijaama seesmistes ühendusliinides ja kui efektiivselt suudetakse üldse põhivõrguga seonduvas liitumispunktis reaktiivvõimsust reguleerida. Viimane sõltub omakorda üldise VAR-regulaatorite juhtimissüsteemi tundlikkusest ja selle paika häälestatusest.

Muuhulgas osutub olulisena määrata kindlaks, milliste generaatoritega paikneb ühtses rühmas teatud ajahetkel reguleeritav seade. Tavapäraselt asetsevad elektriijaamas vähemalt kaks latisektsiooni ning nende külge kinnituvad erineva niminäivvõimsusega generaatorid [23]. Lisaks ühenduvad need latistused omakorda teatud, üldjuhtudel sektsioonidega võrdväärne kogus, jõutrafode sekundaarpooltega. Viimased võivad alajaama ehk käesolevalt elektriijaama normaaltalitluse korral olla omavahel mitteühendatud ehk puudub nendevaheline paralleeltoime. Sedamööda saab tekkida olukord, milles on elektriijaamal mitu liitumispunkti põhivõrguga. Nõnda minimeeritakse energiakadusid ja reaktiivvõimsuse suuremasse elektrisüsteemi edastamist või tarbimist näitena kahes osas. Vastavalt sellele peab ka üldine generaatorite VAR-regulaatorite juhtimissüsteem sobivalt toimima.

Põhimõtteliselt tähendab eelnev väide, et elektriijaama sisemise võrgukonfiguratsiooni tavaolukorra järgi, milles näitena kaks jaotla latisektsiooni on omavahel ühe või mitme võimsuslüli kaudu eraldatud, reguleeritakse liitumispunktide mõõteväärtuseid ning vajadusel kaablite võimsuskadusid teatud generaatorite rühmadega. Teisiti öelduna genereerivad esimese sektsiooni masinad nende latistuse külge kinnituvatele tarbijatele reaktiivvõimsust ja ühtlasi minimeerivad seda põhivõrguga ühendavas liitumispunktis reaktiivvõimsusevahetust, mida saab täiendavalt teha veel nende vahelises ühendusliinis. Sama olukorra järgi toimivad ka teise sektsiooni generaatorid.

Nõnda tuleb seda arvestada üldise generaatorite reaktiivvõimsuste juhtimissüsteemi ülesehituse ja sobiva reaktiivvõimsuste reguleerimismeetodi valimisel. Põhimõtteliselt rakendatakse küll eelnevalt täpsemalt selgitatud VAR-regulaatorite kontrollimise versioone, kuid jagatakse need mitmeteks osapoolteks. Sedamööda võib tekkida situatsioon, mille järgi koosneb üks generaatorite rühm ainult kahest või kolmest mainitud seadmest ning omakorda lihtsustab mõneti rakendatava reguleerimismetoodika valimist.

Samas, elektriijaama võrgukonfiguratsiooni muutumisel ehk näitena trafode vahelisel paralleeltalitusel, hakatakse pigem lähtuma ainult ühes liitumispunktis mõõdetavast reaktiivvõimsusest. Olgugi, et teoreetiliselt saab reguleerida piisavalt optimaalselt ka mitmes ühenduspunktis edastatavat reaktiivvõimsuste koguseid. Mainitu tähendab muidugi üldise juhtimissüsteemi keerukamaks muutmist, mis alati ei ole just kõige otstarbekam [24]. Ennekõike aga iseloomustab kirjeldatu üldjuhtudel vaadeldava elektrivõrgu erandtalitlust, mille korral

ühendatakse jaotla seksioonid kokku. Sellest tulenevalt lülitatakse tõenäoliselt üks elektrijaama ülekandetrafodest välja ja kogu põhivõrku saadetakse aktiivenergia väljub tavapäraselt teise trafo kaudu.

Kokkuvõtlikult on nõnda vajalik generaatorite VAR-regulaatorite juhtimissüsteemile juurde lisada veel seksioonide vaheliste ning trafode sekundaarpooltel asetsevate võimsuslülitite olekute sisendid. Need võimaldavad kindlaks määrata, kas kõigi generaatoritega reguleeritakse ainult ühe liitumispunkti kaudu mõõdetavat reaktiivvõimsuse kogust või tehakse seda mitmes põhivõrguga seonduvas punktis ehk generaatorid on võetud rühmadena. Juhul, kui seda tehakse ühtsena, tuleb üldisele juhtimissüsteemile teha arusaadavaks, millises elektrijaama ja põhivõrku ühendandavas liitumispunktis reaktiivvõimsuse edastamist jälgitakse ning minimeeritakse. See eeldab teatud juhtimissüsteemi siseseid ümberlülitusi, et suunata ühe seksiooni külge kinnituvad generaatorid järgima teise seksiooni ülekandetrafo primaarpoolle paiknevast liitumispunktist saabuvalt teavet.

Muidugi võib tekkida ka olukord, milles elektrijaama võrgukonfiguratsiooni tagajärjel suunatakse generaatorite väljundid mööda ümberkaudseid ühendusi lõpuks ikkagi nende seksiooni jõutrafo primaarpoole liitumispunktini. Siinkohal peab säärase situatsiooni korral generaatorite ergutussüsteemide üldine regulaator suutma efektiivselt edasi toimida ehk jätkata sätteväärtuste järgi reguleerimist. Nõnda tuleb täpsemalt arvestada üldise regulaatori konstrueerimisel vastavat ümberlülituste lisamisega, nagu võimsuslülitite olekute määraja.

2.1.5 Reaktiivvõimsuse jaotamine ühendusliinide võimsuskadude järgi

Teisest küljest on aga võimalik eristada generaatoreid nende klemmide ja jaotla vaheliste ühendusliinide järgi, kuna nende kaudu liigub ainult ühe seadme energia kogus. Juhul, kui selleks kasutatud kaablid on erineva pikkusega ja mitmesuguste ristlõigetega, tekivad nendes ka omavahel varieeruvad takistuste suurused. Sedamööda võib üldisele VAR-regulaatorite juhtimissüsteemile juurde lisada veel täiendavad sisendid, mille kaudu saabub teave generaatorite liinides tekkivatest võimsuskadudest. Ennekõike vaadeldakse ikkagi aktiivvõimsuskadu, kuna elektrijaama üritab optimeerida ja maksimeerida seda põhivõrku saadetakse toodangut. Mainitu sõltub vägagi palju just generaatori poolt väljastatavast aktiiv- ja reaktiivvõimsusest ning viimane võib selles olla märkimisväärse mõjuga. Sedamööda saab minimeerida reaktiivvõimsusega seonduvat avaldistele 2.18 ja 2.19 ning lisatingimustele 2.20...2.22 põhinedes.

$$\min \left(\sum_{i=1 \dots m} Q_{Ti}, \sum_{j=1 \dots n} \Delta P_{LGj} \right), \quad j = 1 \dots n \quad (2.18)$$

$$\Delta P_{LGj} = \frac{P_{Gj}^2 + Q_{Gj}^2}{U_{Gj}^2} \cdot R_j, \quad j = 1 \dots n \quad (2.19)$$

lisatingimustel
$$U_{min} < U_{Gj} < U_{max} \quad ,j = 1 \dots n \quad (2.20)$$

$$Q_{Gj(\text{lubatud min})} < Q_{Gj} < Q_{Gj(\text{lubatud max})} \quad ,j = 1 \dots n \quad (2.21)$$

$$Q_{Gj} \geq Q_T + Q_K \quad ,j = 1 \dots n \quad (2.22)$$

kus ΔP_{LGj} on ühendusliinis tekkiv aktiivvõimsuskadu, MW,

R on liini aktiivtakistus, Ω .

Nõnda on mõistlik esmaselt suurendada kõige väiksema generaatori ja jaotla vahelise liini aktiivvõimsuskaoga masina reaktiivvõimsuse tootlikkust. Juhul, kui mingisuguse teise generaatori vastava ühenduse energiakadu osutub teatud ajahetkel väiksemaks, jätkatakse juba selle generaatori reaktiivvõimsuse suurendamist. Ülejäänud reguleerimise alla kuuluvate generaatorite VAR-regulaatorite juhtimine toimub sarnaselt kirjeldatud põhimõtetega. Reaktiivvõimsuse vähendamisel aga langetatakse esmaselt kõige suurema generaatori ja jaotla vahelises ahelas tekkiva aktiivvõimsuskaoga masina reaktiivvõimsust, kuni mõnel teisel osutub vastava ühenduse aktiivvõimsuskadu suuremaks.

Muuhulgas lähtutakse eeldusest, et generaatorite reaktiivvõimsuse alla reguleerimine lõpetatakse, kui see jõuab arvulise väärtuseni null Mvar. Üldjuhtudel pole elektrijaamades peale generaatorite otseselt teisi seadmeid, mis oluliselt ja suurel määral toodavad reaktiivvõimsust. Ennekõike on tuntavalt kõrgem reaktiivvõimsust tarbivate koormuse osakaal. Seetõttu realiseerub suhteliselt ebatõenäolisena olukord, milles generaatorite jaotla nimipinge kerkib ilma olulise reaktiivvõimsuse genereerimiseta lubatavast ülempiirist väljapoole. Lisaks tähendab mingi generaatori poolt negatiivse reaktiivvõimsuse tarbimine ka vaadeldavate ühendusliinides tekkivate energiakadude kasvu.

Samas, generaatorite ja jaotla vaheliste kaablite aktiivtakistused võivad osutada ka peaaegu samaväärseteks. Nõnda väheneb säärase meetodi järgi VAR-regulaatorite juhtimise põhjendatus. Teoreetiliselt tähendab see näitena reaktiivvõimsuse tõstmise ja langetamise käigus tihedaid ümberlülitusi mitmete generaatorite VAR-regulaatorite vahel, kuna fikseeritud aktiivvõimsuse juures muudab reaktiivvõimsuse komponent vastavates ahelates tekkivat aktiivvõimsuskadu. Sedamööda on mainitu suurused teatud vahemikes mitmete generaatorite ühendustel suhteliselt ühtsed. Kokkuvõtlikult ilmestab eelnev pigem lihtsalt generaatorite võrdelist või sarnast

reguleerimist ja välistab üldise juhtimissüsteemi keerukuse. Lisaks võivad veelkord mainides vastavate ühenduste energiakaod olla vähemääravad elektrijaama jaoks.

Teoreetiliselt saab generaatori ühendusliinide energiakadusid arvesse võttes lähtuda veel nendes hajuvatest reaktiivvõimsustest. Viimane tõstab eriti esile vastavates vahemikes asetsevate reaktorite olemasolu. Kuna tegemist on küllaltki suurt induktiivsust omavate seadmetega, siis tulenevalt sellest kasvavad sääraste liinide reaktiivvõimsuskadud märgatavalt. Sedamoodi võib see olla üheks põhjuseks, miks vältida teatud generaatori reaktiivvõimsuse tõstmist või langetamist arvuliselt väärtuselt null $Mvar$, kuna osa sellest energiast kaob ära reaktoris. Lisaks tähendab reaktiivvõimsuse kasv vastavat seadet sisaldavas ühenduses ka reaktori poolt tarbitava reaktiivenergia suurenemist. Nõnda pole teatud vaatesuuna järgi vaja koormata reaktiivvõimsuse genereerimisega seda seadet, mille ja jaotla vahel asetseb induktiivne element. Viimast eriti olukorras, kui ülejäänud valikus olevate generaatoritega suudetakse vajaminevad eesmärgid saavutada nagu liitumispunktis reaktiivvõimsuse vahetamise minimeerimine või tarbijate koormuse tagamine.

Muuhulgas suurendab eelnevalt kirjeldatu generaatorite üldise VAR-regulaatorite juhtimissüsteemi tundlikkust, kuna selles summeeritakse generaatori ja jaotla vahelistes liinides tekkivad aktiiv- ja reaktiivvõimsuskadud. Nõnda kasvab mainitust tulenevat ka erinevused mitmete generaatorite arvestuses. Seetõttu ei pea liinitakistuste suhteliselt samaväärsete parameetrite tõttu enam nii tihedalt muudatusi tegema generaatorite ergutusüsteemidele saadetavates käsklustes. Kokkuvõtlikult reguleeritakse ühte generaatorit pikemalt ja seetõttu vähenevad nende vahel tehtavad ümberlülitused, mis väldivad kaasnevalt nende omavahelisi tasakaalustamisi ja võnkumisi. Reaalselt saab rakendada ka kombineeritud juhtimissüsteemi ülesehitust, mille raames teatud generaatorite poolt genereeritud reaktiivvõimsuse protsendihulgani reguleeritakse neid vastavalt jaotlaga ühenduvate liinide võimsuskadudele ja sellest edasiselt näitena võrdeliselt.

2.1.6 Reaktiivvõimsuse jaotamine ühendusliinide võimsuskadude suhteliste juurdekasvude järgi

Samas, lihtsalt generaatorite ja jaotla vahelistes ühendustes tekkivate võimsuskadude igahetkeline ajaline võrdlemine ei pruugi kokkuvõtlikult anda kõige efektiivsema tulemuse. Juhul, kui on tegemist erineva pikkuste kaablitega, millede aktiiv- ja reaktiivtakistused on erinevad, tekib olukord, milles arusaadavalt eelistatakse reaktiivvõimsuse tõstmisel nendest madalamat väärtust omavaid lülisid. Üldiselt vaadates see ongi ootuspärane olukord, kuid tõenäoliselt on nende samade liinide võimsuskadude kasv iga juurde genereeritava reaktiivvõimsuse kohta suurem, kui mõnel teisel. Seetõttu tõusevad ka nendes ühendustes tekkivad energiakaod kiiremini ja võib esineda

situatsioon, milles valitud generaatorite liinide põhjustatud võimsuskadud regulaatorite rakendamisel on küll ülejäänutega võrreldes madalamad, kuid resulteeruvalt on summaarselt vastavates ühendustes tekkivad võimsuskadud suuremad, kui mõnel muul meetodil reaktiivvõimsust jagades.

Nõnda tasub arvesse võtta generaatorite ja jaotla vahelistes ühendustes tekkivate võimsuskadude võrdlemisel pigem nende marginaalkulu ehk reaktiivvõimsuse suhtelise juurdekasvu karakteristikut. Sedamööda osutub võimalikuks suurendada just selle generaatori reaktiivvõimsust, mille jaotlaga ühendavas liinis kasvab võimsuskadu iga lisanduva reaktiivvõimsuse ühiku kohta kõige aeglasemalt. Ühest küljest hakatakse nüüd hoopis tõstma näitena kõrgemate ühendusliini võimsuskadudega generaatori reaktiivvõimsust, kuid kokkuvõtlikult saavutatakse madalamad energiakadude suurused teatud reaktiivvõimsuse koguse juures. Säärast meetodit saab esitada avaldisega 2.23 ja lisatingimustega 2.24...2.26.

$$\min \left(\sum_{j=1 \dots n}^n \frac{\partial \Delta P_{LGj}}{\partial Q_{Gj}} \right), \quad j = 1 \dots n \quad (2.23)$$

lisatingimustel $U_{min} < U_{Gj} < U_{max} \quad , j = 1 \dots n \quad (2.24)$

$$Q_{Gj(\text{lubatud min})} < Q_{Gj} < Q_{Gj(\text{lubatud max})} \quad , j = 1 \dots n \quad (2.25)$$

$$Q_{Gj} \geq Q_T + Q_K \quad , j = 1 \dots n \quad (2.26)$$

Üldjoontes sõltub vägagi palju lõplikult vajaminevast reaktiivvõimsuse hulgast ja viimasest tulenevalt võib esineda olukord, milles marginaalkulude järgi reaktiivvõimsuse reguleerimine annab suhteliselt samaväärsed tulemused kui lihtsalt liinikadusid võrreldes. Seda muidugi siis, kui mõõteväärtuste järgi reguleerides on need enamjaolt samasugused, ning rakendatakse generaatoreid, millede võimsuskadude juurdekasv on laugem. Teisel juhul võib nende kahe meetodi lõppresultaadid olla suhteliselt samaväärsed olukorras, milles aktiivvõimsuskadude mõõteväärtuste järgi tõstetakse esmaselt teatud generaatorite reaktiivvõimsust ning olles saavutanud lubatava reaktiivvõimsuse ülempiiri, hakatakse rakendama teisi või ülejäänud generaatoreid madalamate võimsuskadude suhteliste juurdekasvudega. Samas, vajaminev tarbijate või mõne muu poolt nõutav reaktiivvõimsuse kogus peab olema piisav, et järgnevate generaatorite osakaal oleks kokkuvõttes märgatav.

2.1.7 Täiendavad võimalused ja peamiste meetodite võrdlus

Olukorras, milles juhitava generaatori klemmi ja seda jaotlaga ühendava kaabelliini võimsuskaod pole märkimisväärselt erinevad teineteisest ja nende mõju on üldisele elektrijaama efektiivsusele madal, võib generaatoreid eristada veel nende karakteristikute järgi. Samas, mainituna on põhimõtteliselt tegemist PQ-kõveratega või ergutussüsteemide lülide parameetritega. Lähtuvalt sellest, et generaatorid on ennekõike ainult elektrenergia väljastajad, määrab nende pöörlemiskiiruse saavutamise maksumuse ikkagi nendega ühendatud turbiinide ning katelde kütte- ja marginaalkulude karakteristikud [13]. Seetõttu osutub vajalikuks juba siduda omavahel elektrijaama kaks poolt, millest teine ehk soojuslik muutub aeglasema ajaintervalliga. Nõnda tasub pikemalt arutleda, kas näitena põhivõrguga ühendatavas liitumispunktis reaktiivvõimsuse vahetamise vähendamine nõuab just elektrijaama soojuslike parameetrite järgimist.

Lisaks sõltub viimasest pigem generaatori aktiivvõimsuse väljastamise suurus. Reaktiivvõimsuse genereerimine on sellega kaasnev ja tuleneb ergutussüsteemi reguleerimisest. Teoreetiliselt üritab elektrijaam toota ikkagi maksimaalse koguse aktiivvõimsust, mida teatud generaator on võimeline saavutama. Juhul, kui see on piiratud mingisuguse suuruse juures, on tegemist juba pikemaajalise planeeringuga, mis tuleneb kokkuvõtlikult turbiinide ja katelde seadistustest ning elektrituru toimimisest ja vajadustest [13]. Võrreldes tarbijate või põhivõrgu poolt nõutava reaktiivvõimsuse muutusega tähendab aktiivvõimsuse ehk generaatorite pöörlemiskiiruse säilitamine suurenenud koormuse kasvul pikemaajalist protsessi, mis hõlmab endas nii primaar- kui ka sekundaarreguleerimist [19].

Siinkohal tasub veel lisada, et elektrijaamad võivad tulenevalt oma ülesehituselt vajada pidevas ja vähemuutuvas koguses aktiivenergiat, näitena omatarbe jaoks. Samuti võib teatud ettevõttel olla mingisugune suurem tootmisobjekt nagu õlitehas, mille raames vajatakse suuremat kogust elektrivõimsust. Nõnda saab mõneti eeldada, et nõutav suurus on ajaperioodis suhteliselt väheselt muutuv. Lisaks ei ole sealjuures välistatud, et säärane suuremahuline üksus sisaldab eneses ka elektrijaama, millega tagatakse vajaminev energiaressurs. Kohapealsest vajadusest üle jääv aktiivvõimsus aga edastatakse põhivõrku ehk üleüldisesse elektriturgu. Kokkuvõtlikult tähendab tootmise ja liitumispunkti kaudu elektrenergia saatmine etteplaneerimist ja sellest tulenevalt ei ole alati võimalik saavutada selles kiireid muudatusi.

Teoreetiliselt saab generaatorite VAR-regulaatorite juhtimissüsteemis elektrijaama soojuslikku poolt arvesse võtta sarnaselt eelpool kirjeldatud liinides tekkivate võimsuskadude meetoditega. Teisiti öelduna lisatakse sellesse sisendid, mille kaudu edastatakse turbiinide ja katelde karakteristikutel põhinevate võrrandite resultaadid. Nendest kõige väiksema võrranditel põhineva

tulemiga generaatoril tõstetakse esmaselt reaktiivvõimsust. Põhimõtteliselt võib siinkohal esile tõsta näitena marginaalkulude võrdlemise [19]. Samas, säärane lahendus pole siiski väga otstarbekas ja ei too endaga kaasa elektriijaama elektrilise osa efektiivsuse kasvu.

Täiendavalt tasub veel lisada, et hoides generaatorite jaotlate latipingeid võimalikult kõrged, vähenevad sellega kaasnevalt ka ühendusliinides tekkivad võimsuskaod. Sääraselt vaadatuna on tegemist samuti ühe optimeerimismeetodi aluspõhjaga. Samas, reaalses situatsioonides on pigem vajalik jätta teatud reserv lubatava pingeväärtuse ülempiirini ja talitleda ikkagi nimipinge suuruse läheduses [25]. Teisest küljest on mõistlik võtta arvesse generaatorite reaktiivvõimsuste reguleerimise juures pingete väärtuste mõju lõpptulemusele.

Muuhulgas mõjutavad generaatorite reaktiivvõimsuste reguleerimise efektiivsust jõutrafode astmelülitite asendite muutmised. Nimetatuga kaasneb jaotla latipingete järsk tõus või langus, mis omakorda on resulteeruv generaatorite ergutussüsteemide reageeringuga. [12], [26]. Nõnda võib VAR-regulaatoreid liinikadude järgi juhtides tekkida astmelülitite toimingute tagajärjel ebakorrapärasused, milles teatud generaator toodab rohkem või vähem reaktiivvõimsust, kui seda tehakse optimaalselt vastava meetodi järgi reguleerides.

Ühest küljest on säärase olukorra lahendusena võimalik rakendada täiendavaid juhtimissüsteemi lülisid, millega teatud ajavahemiku tagant astmeliselt või lineaarselt muudetakse generaatorite reaktiivvõimsusi kindla arvulise suuruse võrra, et kokkuvõttes tagada liinikadude minimeerimisel põhinev reaktiivvõimsuste genereerimine. Esimesel meetodil ehk astmeliselt tehes võidakse saavutada lõplik eesmärk pikema ajalise perioodi tagant, teisele tuginedes on see saavutatav kiiremini. Samas, lineaarselt lähenedes kujuneb loogikatehetel põhinev ülesehitus keerulisemaks.

Eeldades, et elektriijaama tarbijate koormus muutub ajas pidevalt ja trafode astmelülitite asendid reguleeritakse samuti kindlate viivitustega, siis on osaliselt ebareaalne täies ulatuses juhtida generaatorite reaktiivvõimsuseid liinides tekkivate võimsuskadude järgi [12]. Ennekõike on vajalik hoida need võimalikult madalad ja sealjuures vältida juhtimissüsteemi ülesehituse mahukust. Muuhulgas võivad osutada liinikadude omavahelised erinevused suhteliselt väikesteks ning teisena ehk omavad need vähemääravat osa kogu elektriijaama reaktiivvõimsusega seonduvates kadudes, millega omakorda saab selgitada täiendavate lülide mittelisamise.

Järgnevas tabelis 2.1 on kokkuvõtlikult ära toodud peamised parameetrid olulisemate meetodite kohta, millega saab generaatorite vahel reaktiivvõimsust jagada.

Tabel 2.1. Olulisemad erinevused generaatorite reaktiivvõimsuste juhtimise meetodites

Reaktiivvõimsuse jagamise meetod	Eelised	Puudused
Võrdeliselt (peatükk 2.1.1)	Lihtne reaktiivvõimsuste regulaatori ülesehitus	Generaatorid on ebaproportsionaalselt koormatud
Proportsionaalselt aktiivvõimsuse järgi (peatükk 2.1.2)	Reaktiivvõimsus jaguneb generaatorite vahel ühtlaselt vastavalt nende võimekusele	Võimsama generaatori välja lülitumine tekitab järsu reaktiivvõimsuse vajaduse
Proportsionaalselt reaktiivvõimsuse limiidi järgi (peatükk 2.1.2)	Reaktiivvõimsus jaguneb generaatorite vahel ühtlaselt vastavalt nende PQ-kõverale	Võimsama generaatori välja lülitumine tekitab järsu reaktiivvõimsuse vajaduse Keerukam regulaatori konstruktsioon
Järjestikuliselt (peatükk 2.1.3)	Suhteliselt lihtne reaktiivvõimsuste regulaatori ülesehitus	Generaatorid on ebaproportsionaalselt koormatud
Ühendusliini aktiivvõimsuskao mõõteväärtuse järgi (peatükk 2.1.5)	Võimalik rakendada esmaselt madalama ühendusliinide aktiivvõimsuskaoga generaatoreid	Minimaalsete võimsuskadude saavutamine pole optimaalne Generaatorid on ebaproportsionaalselt koormatud Keeruline regulaatori struktuur
Ühendusliini reaktiivvõimsuskao mõõteväärtuse järgi (peatükk 2.1.5)	Võimalik rakendada esmaselt madalama ühendusliinide reaktiivvõimsuskaoga generaatoreid	Minimaalsete võimsuskadude saavutamine pole optimaalne Generaatorid on ebaproportsionaalselt koormatud Keeruline regulaatori struktuur
Ühendusliini võimsuskao suhtelise juurdekasvu järgi (peatükk 2.1.6)	Minimaalsete võimsuskadude saavutamine piisavalt optimaalne	Generaatorid on ebaproportsionaalselt koormatud Küllaltki keeruline regulaatori struktuur

Eelnevas tabelis 2.1 mõeldakse regulaatori struktuuri keerulisuse astmete all ennekõike üldises reaktiivvõimsuste regulaatoris olevate komponentide rohkust ja nende omavahelist seotust. Näitena võimsuskadusid arvestavate meetodite korral tuleb kasutada spetsiaalseid selektoreid, mis neid omavahel võrdlevad ning rakendada lülitusi, et tagada sobiva sisendi kasutamine. Samas, võrdelise meetodi korral piisab üldistades lihtsalt paarist arvutustehtest generaatorite võimsuste summeerimisel ja jagamisel. Muidugi sõltub juhtimissüsteemi keerulisus veel selle enese konstruktsioonist, mille selgitamisel peatutakse praeguse peatüki lõpupoole.

Käesoleva magistritöö järgnevas ehk kolmandas peatükis lähtutakse generaatorite reaktiivvõimsuste regulaatori konstrueerimisel põhimõttest, et oleks võimalik jagada seda generaatorite vahel mitmel erineval meetodil. Seda ennekõike reguleerimise efektiivsuse hindamisel ja samuti juhtimissüsteemi ülesehituste võrdlemisel. Lisaks on tõenäoliselt iga erineva elektrijaama või tööstusobjekti näol tegemist isepärase struktuuriga ja seetõttu ei ole alati põhjendatud igasugused valikud meetodite osas. Eelnevast tabelist 2.1 võib siiski esile tõsta reaktiivvõimsuse jaotamise võrdeliselt, proportsionaalselt aktiivvõimsuse, proportsionaalselt reaktiivvõimsuse limiidi, ühendusliini aktiivvõimsuskao mõõteväärtuse ja ühendusliini aktiivvõimsuskao suhtelise juurdekasvu järgi. Nendel versioonidel on eeliseid, mis võivad osutuda vastuvõetavateks ja realiseeritavateks teatud kasutajate jaoks ning nende üle arutleti selle peatüki raames. Teoreetiliselt kõige mitmekülgsemat lahendust pakub viimasel kahel nimetatud meetodil põhinev reaktiivvõimsuste regulaatori ülesehitus, kuna sisemiste parameetrite ja sisendite seadistamisega on saavutatav ka mitmete teiste meetodite järgi reguleerimine.

2.2 Reaktiivvõimsuste reguleerimise jaoks vajalikud sisendid

Mitme generaatori VAR-regulaatorite juhtimise jaoks on vaja saata nende üldisesse regulaatorisse erinevaid sisendandmeid. Mainitute kaudu tehakse kindlaks võimsuslülitite asendite, liinipingete ja vajadusel voolude väärtused generaatorite ja põhivõrgu liitumispunkti vahelises elektrivõrgus. Samuti on vastav teave määrav, et tagada juhtimissüsteemi optimaalne toimimine. Viimasesse saabuvad väärtused võib jaotada kahte rühma:

- Binaarsed ehk teatud lüli ja elemendi olekut iseloomustav suurus;
- Ajaliselt muutuvad mõõteväärtused.

Esimesed nimetatutest on ennekõike võrgukonfiguratsiooniga seonduvad ning näitavad võimsuslülitite asendeid ehk teatud liinide või generaatorite elektrivõrguga ühenduvust. Sellest teabest sõltub näitena, milliste generaatorite reaktiivvõimsust reguleeritakse ning kas trafod on paralleellülituses või mitte. Samuti on juhtimissüsteemis seesiselt otstarbekas kasutada loogikatehetel ja olekutel põhinevaid lülitusi [27]. Mainitud on piisavalt efektiivsed erinevate piirajate ning ümberlülituste jaoks.

Ülejäänud juhtimissüsteemi sisenevad mõõteväärtused on pigem ajaliselt pidevalt muutuvad ning iseloomustavad ühendusvõrgu elektrilisi parameetreid nagu pingeid ja voole. Lisaks veel generaatorite poolt toodetavat aktiiv- ja reaktiivvõimsust. Samuti on sääraselt määratletud ka tarbijate koormuseid tähistavad suurused.

Eelnevalt kirjeldatud teavet saab selekteerida järgnevalt:

- Selle järgi määratakse peaeesmärgi võimalik olek;
- Seda kasutatakse üldise regulaatori peaeesmärgi täitmise saavutamise juures.

Üldise generaatorite VAR-regulaatorite juhtimissüsteemi peamiste eesmärkidena elektrijaamas on nagu öeldud seesmist tarbijate koormusnõuete tagamine, ühendusliinide võimsuskadude langetamine ja põhivõrguga seonduvas liitumispunktis reaktiivvõimsuse vahetuse minimeerimine. Lisaks veel loomulikult jaotlate pingeväärtuste lubatavas vahemikus hoidmine. Sõltuvalt sellest, millist nimetatutest eelistatakse, kujuneb ka üldise regulaatori ülesehitus. Samuti tugineb valikust, kas teatud mõõteandmetega on tegemist reguleerimise lõpptulemust iseloomustava suurusega või viimase saavutamise juures vajaminevaga.

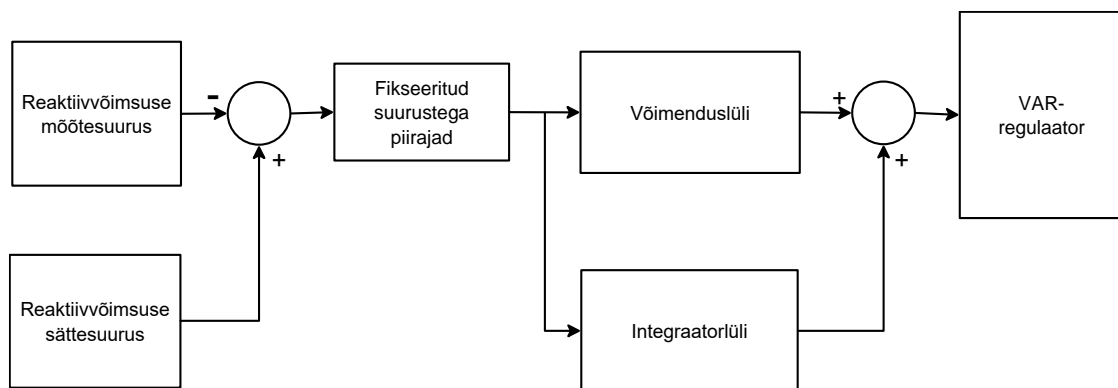
Juhul, kui juhtimissüsteemi saavutat teavet kasutatakse peaeesmärgi täitmisele kaasnevalt, piisab lihtsalt selle saatmisest kindlatele regulaatorlülidele. Vastavate väärtuste järgi tehakse näitena kindlaks, kas generaatorite reaktiivvõimsuse tootmine ja lattide pinge on lubatavates piirides. Samuti määratakse ära elektrijaama sisemistes liinides tekkivad võimsuskadod ja vajadusel lähtutakse nendest generaatorite reaktiivvõimsuste muutmistel. Olukorras, milles juhtimissüsteemi sisenevat mõõteväärtust rakendatakse üldise generaatorite reaktiivvõimsuste reguleerimise peaeesmärgi jaoks, tuleb läheneda sellele teisest vaatenurgast. Nimelt osutub vastav suurus määravaks, kas reguleerimise tulemus on saavutatud või mitte. Sedamööda peab paika seadistama kindla arvulise väärtuse, mis tähistab reguleerimise lõppemist.

Siinkohal tasub mainida, et ka kaasneva teabe juures nagu erinevad piirajad on vaja eelnevalt sätestatud suuruseid, kuid neid kasutatakse juhtimissüsteemis otseselt, ilma mõjutamata. Teiste sõnadega näitena mingisuguse generaatori reaktiivvõimsuse suurus ja selle muutus registreeritakse juhtimissüsteemis koheselt. Samas, liitumispunktis reaktiivvõimsuse väärtust minimaalsena hoides või ka mõnda teist elektrivõrgu parameetrit alusena võttes, ei ole otstarbekas koheselt ja järsult mainitu muutusele reageerida. Ennekõike võib säärane olukord põhjustada generaatorite poolt toodetavate reaktiivvõimsuse suuri ja kiireid kõikumisi [7]. Võttes arvesse, et nende ergutussüsteemid sisaldavad protsesse aeglustavaid lülide kogumeid, siis kokkuvõtlikult tekivad äkiliste reguleerimismuutuste tagajärjel pikemaajalised sumbuvad generaatori reaktiivvõimsuse tõusud ja langused. Mitme generaatori ühtsel reguleerimisel võivad samamoodi esineda vastavate masinate omavahelised võnkumised ja tasakaalustamised [2].

Sedamööda osutub vajalikuks reaktiivvõimsuste reguleerimise juures rakendada teatud sujuvamat eesmärgi täitmist võimaldavaid PI- või PID-lülisid. Vastavate ülesehitus ja eesmärk on sarnane VAR-

regulaatorite omaga. Esmaselt suudavad need piirata väljuva väärtuse muutumise kiirust. Lisaks ei muutu enam nende väljund teatud sätteväärtuse saavutamise korral. Nõnda on tegemist küllaltki optimaalsete lahendustega. [28], [29]

Siinkohal on oluline, et mingit mõõteväärtust jälgiv ja selle muutusele reageeriv PI- või PID-lüli toimib aeglasemalt kui reguleeritava generaatori VAR-regulaator. Viimane peab üldjuhtudel omakorda laskma generaatori ergutussüsteemil saavutada stabiilne olek ehk selle väljund ei tohiks enam eriti muutuda. [30] Vastasel korral ilmnevad generaatoril võnkumised nagu eelpool sai kirjeldatud. Edasisel joonisel 2.1 on esitatud reaktiivvõimsuse reguleerimise eesmärki täitva PI-lüli lihtsustatud ülevaade.

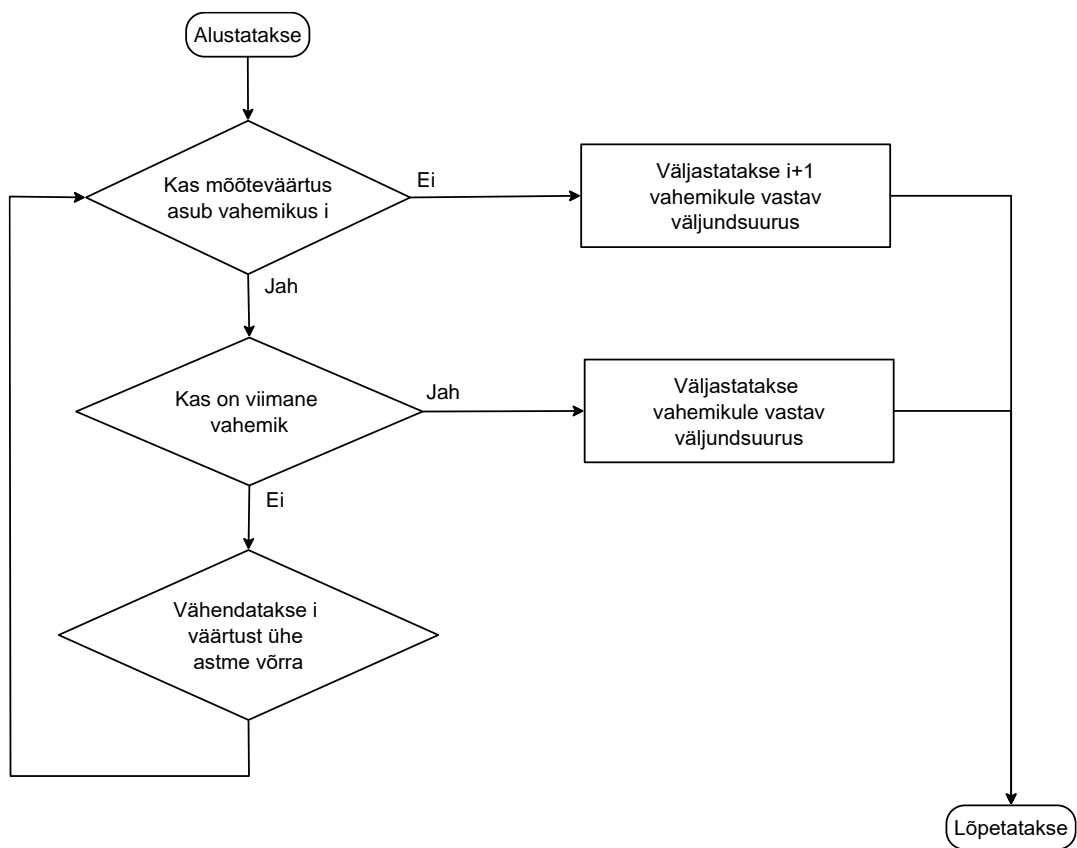


Joonis 2.1. Reaktiivvõimsuse mõõteväärtuse muutumist järgiva Pi-lüli põhimõtteskeem

Teoreetiliselt võib PI-lülid asendada ka mingisuguste sarnast lõppresultaati pakkuvate versioonidega ning lahendustega. Samas, tegemist on piisavalt otstarbeka ja laialdaselt kasutatava vahendiga saavutamaks soovitud eesmärk. Muuhulgas on säärane element suhteliselt lihtsa ülesehitusega ja küllaltki töökindel ning otseselt puudub vajadus igas olukorras diferentsiaalkomponendi järele. Teisest küljest on vaja paika seadistada PI-lülides olevad komponendid nagu võimendus- ja integraatorlüli ehk valida õiged parameetrid tagamaks korrekse reguleerimisvõimekuse. Lisaks on vaja otsustada, milliste arvuliste suurustega fikseeritud piirajaid kasutatakse vastavas PI-lülis. Nõnda võib teatud vaatenurgast lähenedes osutada keeruliseks kiirelt määrata kõige sobivamad seadistusväärtused. [31]

Ühe võimaliku PI-lüli asendava lahendusena võib esile tõsta teatud järjestikuliste vahemike järgi reguleerimist. Täpsemalt öeldes võetakse kindel arvuliste suuruste vahemik ja jagatakse see mitmesse osasse, mis ei pea olema omavahel võrdsed. Pigem ongi vajalik eelnevalt paika määratud sätteväärtusele lähenedes, mis tähistab reguleerimise lõppu, kitsendada vahemike laiust. See on oluline reguleerimiskiiruse aeglustamiseks ja ülevõngete vältimiseks.

Nõnda, kui sätteväärtusega võrreldav mõõtesuurus osutub mahtuvaks esmasesse kõige laiemasse vastavasse osasse, hakatakse edastama teatud muutumatut arvulist suurust. Eeldades, et reguleerimine toimib ootuspäraselt ehk sätteväärtuse suunas, liigub mõõtesuurus edasi järgnevasse vahemikku, milles väljastatakse juba eelmisest väiksemat ajas muutumatut arvulist väärtust. Sedamööda aeglustub reguleerimiskiirus saavutatavale sätteväärtusele lähenedes ja ühtlasi tõuseb täpsus. Viimast on võimalik suurendada rohkem erinevaid vahemikke kasutades. Kirjeldatud lahendus on tänapäeval lihtsasti rakendatav võttes arvesse tööstuskontrollerite võimekust [32]. Põhimõtteliselt tugineb kogu vastava meetodi ülesehitus kui-lülidele, mida iseloomustab joonis 2.2.



Joonis 2.2. Järjestikkulistel vahemikel põhinev reguleerimine

Samas, mainitud PI-lüli asendaja suudab ikkagi väljastada ainult kindlaid eelnevalt paika seadistatud väärtuseid, ja seetõttu puudub sellel otsene sujuv reguleerimine. Pigem jääb selle väljundi muutus astmeliseks, millede omavahelised erinevused sõltuvad eelneva ja järgneva vahemikku ulatustest. Seetõttu küllaltki suurt reguleerimistäpsust nõudes on vajalik kasutada suhteliselt rohkelt kui-lülisid ehk kindlat muutumatut väärtust sisaldavaid vahemikke. Lisaks on vaja konstrueerida mingisugune element, mis suudab edastatud väärtuseid summeerida ja sedamööda võimaldab mõõteväärtusel

liikuda järgnevasse vahemikku. Sellena saab näitena rakendada integraatorlüli. Nõnda võib olla kokkuvõtlikult otstarbekam kasutada ikkagi traditsioonilist PI-lüliga versiooni.

Teoreetiliselt saab omavahel kombineerida PI-lüli järjestikuliste vahemike meetodiga. Ennekõike alguses reguleeritakse sedamoodi mõõtesuuruse sätteväärtusele lähenedes väljundi muutumist astmeliselt ja lõppeesmärgi ligiduses kasutatakse täpsuse tõstmisel juba PI-lüli. Samas, kui mingisugust otsest vajadust selliseks valikuks pole, siis on keeruline säärast eelistust põhjendada. Muuhulgas on võimalik kombineerida veel mitmesuguseid erinevaid eelnevalt kirjeldatutega sarnaseid regulaatoreid. Ühena võib esile tõsta ülesehituse, milles iga generaatori VAR-regulaatori ees paikneb integraator, mille väljundväärtust muudetakse vastavalt sellesse elementi saadetavate arvuliste suuruste sisse ja välja lülitamisega. Teatud osas kattub selle ülesehitus astmeliselt reguleeritava regulaatoriga. Samas on jällegi keerukam tagada säärase versiooni sujuv reguleerimine sätteväärtuse ümbruses. Lisaks oleks parema reguleerimisulatuse saamise jaoks vajalik ikkagi kasutada võimenduslüli. [33] Viimane muudab aga kogu lahenduse põhimõtteliselt PI-regulaatoriks.

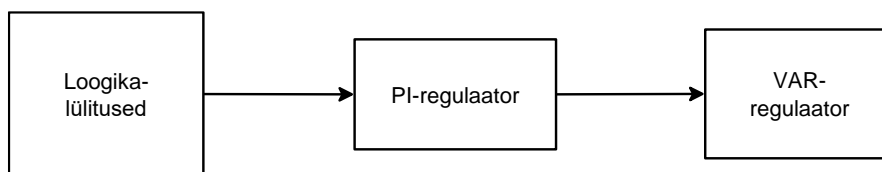
Kokkuvõtlikult on peaesmärgina paika määratud mõõteväärtuse järgi VAR-regulaatorite juhtimise ülesehitamine ennekõike selle konstrueerija otsustada. Tema valikul kasutatakse teatud lülide kombinatsioone ja nende järjestikuseid asetsemise meetodeid. Nõnda võib üldine generaatorite reaktiivvõimsuste reguleerimine põhineda mõnel lihtsamal struktuuril, kuid samas hoopis teistpidi saab rakendada arvutusprogrammipõhiseid andmete ajas pidevalt salvestamist ja sellega seonduvat haldust [34]. Viimane versioon on tuntavalt keerukam ja säärane valik pole alati põhjendatud. Üldistades on mõistlik kasutada neid lahendusi, mis on töökindlad ja millega saab eesmärgid täita võimalikult väheste komponentidega [35].

2.3 Generaatorite reaktiivvõimsuste fikseerimine

Juhul, kui kõik või teatud rühmas asetsevad generaatorid järgivad nende jaoks seadistatud PI-lüli või mõnda sarnast ekvivalenti, mõjutab viimane mainitud korraga. Generaatorite reaktiivvõimsusi võrdeliselt või proportsionaalselt juhtides ei ole otseselt oluline, kui peaesmärgina paika määratletud mõõteväärtus muutub. Teisest küljest võib tekkida vajadus rakendada sõltuvalt kasutatavast meetodist veel täiendavaid lahendusi olukorras, milles ühtselt ehk samas ajaperioodis reguleeritakse rohkem kui ühe generaatori VAR-regulaatorit. Nende eesmärgiks on hoida teatud generaatorid fikseeritud reaktiivvõimsuse tootmise juures, seda ka juhul kui muutub reguleerimise alusena oleva PI-lüli väljundväärtus. Nõnda osutub lisalülituste üldisesse juhtimissüsteemi sisse toomine vajalikuks, et tagada kindla generaatori reaktiivvõimsuse mitte muutmine.

Ennekõike saab säärase lahenduse rakendamise selgitusena esile tõsta lähtumise reaktiivvõimsuste reguleerimisel generaatorite karakteristikutest või liinides tekkivatest võimsuskadudest. Muuhulgas ka näitena masina reaktiivvõimsuse ülempiiri saavutamisel või mõnel sarnasel põhjusel. Seega on vajalik, et mingisugusest hetkest või reaktiivvõimsuse suurusel lõpetab üks generaator reaktiivvõimsuse tõstmise või langetamise ja teine hakkab omakorda seda suurendama või vähendama. Teisiti öelduna tuleb konstrueerida lülid, mis hoiavad või võimaldavad hoida teatud arvulisi suuruseid ja muudavad neid vajaduse ilmnemisel. Põhimõtteliselt saab selle sõnastada osakaalude regulaatorina ehk reaktiivvõimsuse fiksaatorina.

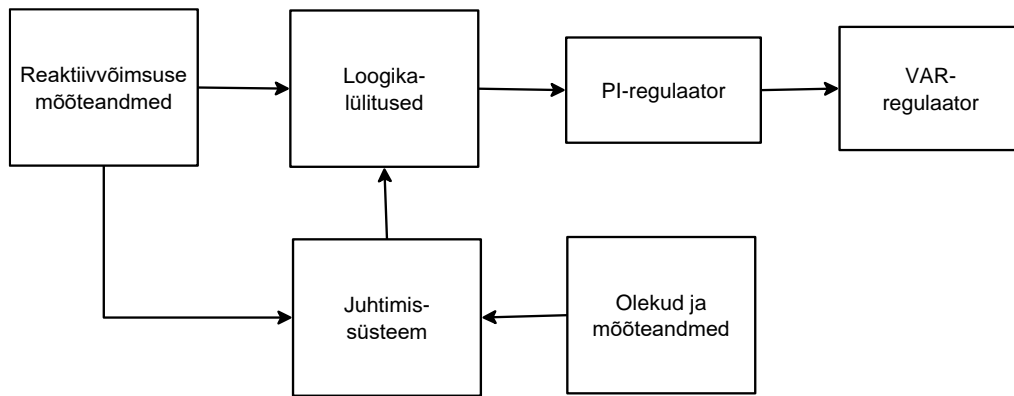
Teoreetiliselt on nende koostamisel mitmeid erinevaid võimalusi. Näitena ühe versioonina võib kasutada iga generaatori VAR-regulaatori ees PI-lülides rakendatavaid integraatorelemente, kuna nende väljastatav väärtus summeerub ehk muutub sõltuvalt sissetulevast arvulisest suurusel. Sedamööda osutuvad need üpris sobivaks fikseerimaks kindlad väljundid. Sealjuures piisab ainult iga trafo kohta ühe PI-regulaatori lisamisest, kuid selle mõju avaldub mitmele generaatorile. Teise lahendusena on võimalik hoopis PI-regulaatorid konstrueerida igale generaatorile eraldi ja nende ette asetada vajalikud lülitused. Säärast põhimõtet iseloomustab joonis 2.3.



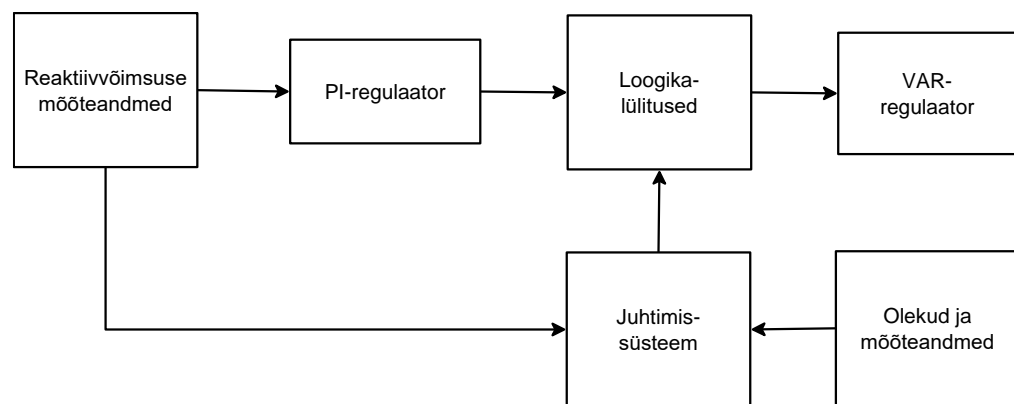
Joonis 2.3. Generaatori reaktiivvõimsuse osakaalu regulaatori võimalik ülesehitus (iga generaatori kohta on eraldi PI-regulaator)

Kolmandana saab tugineda mitmesugustele mälu komponendidele, mis lubava oleku korral lasevad saabuvat arvulist suurust väljundisse, kuid selle puudumisel edastavad enne oleku muutust läbiminevat viimast väärtust. Muuhulgas on võimalik ka vastupidine reageering. Samas, säärase elementide korral on vajalik üles ehitada tõenäolisemalt keerukam loogikateheteel põhinev struktuur, kui põhiliselt integraatoreid või generaatoritel eraldi PI-regulaatoreid kasutades. Lisaks on sealjuures veel oluline järgmise oleku vahetuse tagajärjel tekkiva järsu arvulise väärtuse muutuse silumine. Integraatorite korral on selle väljundi kontrollimine mõneti lihtsam, kuna vastava elemendi enese toimekiirust saab muuta. Kokkuvõtlikult, olenemata lülide konstruktsioonist, tuleb paika seadistada neid rakendavate käskluste loogika ülesehitus [27].

Edasistel joonistel 2.4 ja 2.5 on ülevaatlilikult toodud kahe peamise generaatorite reaktiivvõimsuste fikseerimise meetodi põhimõtted.



Joonis 2.4. Generaatori reaktiivvõimsuse osakaalu regulaatori põhimõtteskeem (iga generaatori kohta on eraldi PI-regulaator)



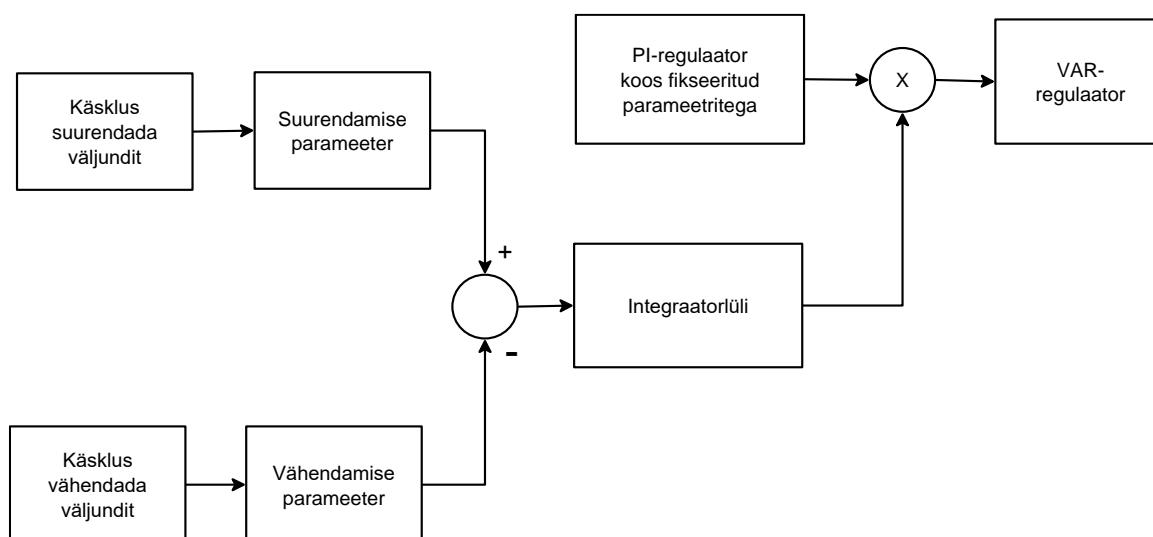
Joonis 2.5. Generaatori reaktiivvõimsuse osakaalu regulaatori põhimõtteskeem (iga trafo kohta on eraldi PI-regulaator)

Ennekõike on seega vajalik omavahel seondada PI-lülis ehk regulaatorist väljuv arvuline väärtus ja seda teatud ajahetkel fikseeriv komponent. Juhul, kui kasutatakse mingisuguseid mäluga elemente või konstrueeritakse PI-regulaator igale generaatorile eraldi, on saavutatav sellest edastatava suuruse muutmine sõltumatuks PI-lülisse sisenevast mõõteväärtusest. Nõnda, näitena liitumispunktis mõõdetav reaktiivvõimsuse tõus võib ilmnedda seda jälgivas PI-regulaatoris, kuid ilma täiendavate käsklusteta ei muuda säärane situatsioon fikseeriva elemendi väljundit ning resulteeruvalt teatud generaatori reaktiivvõimsus jääb samaks. Teisest küljest on integraatoril põhineva lahenduse ehk iga trafo kohta eraldi PI-regulaator rakendamisel osaliselt keerukam välistada PI-lüli mõjutust. Seda välja arvatud juhul, kui peaeesmärgi täitmist reguleeriv lülitus mainitud ei sisalda.

Samas, eeldades et reaktiivenergia tarbimine on ajaliselt pidevas muutumises, piisab ka PI-regulaatori mõju minimeerimisest või selle suhteliselt madalal hoidmisest, kui kasutatakse integraatoril põhinevat generaatorite reaktiivvõimsuste fikseerimise lahendust. Muuhulgas võib

konstrueerida kombinatsiooni, milles üldistavalt 95% generaatorite VAR-regulaatorite sätteväärtustest põhineb integraatori väljundil ja ülejäänud sõltub PI-regulaatorist. Teoreetiliselt on lisaks võimalik vähendada või suurendada PI-lüli mõju fikseeritavatele sätteväärtustele seondades see integraatoriga korrutustehtele tuginedes. Säärane meetod võib muuta mõlema komponendi väljundite erinevust märgatavalt kui liitmistehte kasutamine.

Siinjuures on siiski oluline rakendada veel täiendavat lisameedet. Nimelt PI-regulaatori osakaalu vähendamisel tasub selle väljundi arvuline suurus hoida suhteliselt madalal ja lisaks anda korrutisele ette teatud kindel väärtus ehk sedamööda integraatorist tulenevale suurusele. Viimasele omakorda liidetakse PI-regulaatori väljund. Kokkuvõtlikult reguleeritakse nõnda erinevate generaatorite ergutussüsteeme loogikatehete põhjal summeerivaid integraatoreid kasutades ning PI-lüliga sooritatakse täpsemat regulatsiooni peaesmärgina seatud mõõteväärtuse saavutamisel. Joonisel 2.6 on üks osakaalu regulaatori võimalik lahendus, kui tuginetakse mitme generaatori reaktiivvõimsuse reguleerimisel ühisele PI-regulaatori väljundile.



Joonis 2.6. Generaatori reaktiivvõimsuse osakaalu regulaatori võimalik ülesehitus, kui rakendatakse mitme generaatori kohta ühist PI-regulaatorit.

Samuti tasub lisada, et PI-regulaatori väljundile teatud fikseeritud arvulise suuruse juurde liitmisega välditakse olukorda, milles korrutise väärtus muutub hetkeliselt vastasmärgiliseks ehk negatiivseks. Viimane võib endaga kaasa tuua generaatorite reaktiivvõimsuste järsu muutuse ja sellega kaasnevalt langetada elektrivõrgu lokaalset või üldisemat stabiilsust. Nõnda on mõistlik mitte saata PI-regulaatori edastatavat suurust otse korrutuslülisse.

Kasutades erinevaid mäluga elemente generaatorite reaktiivvõimsuste fikseerimistel säärast olukorda ei esine, samas teisest küljest on jällegi vajalik tagada täiendavate lülide korral PI-

regulaatori väljundi piisav ulatus. Nõnda võib tekkida situatsioon, milles PI-lüli võimenduskomponendi suurus jääb madalamaks kui nõutav, et tagada generaatori VAR-regulaatori sätteväärtuse optimaalne muutus. Teiste sõnadega öeldes ei saavutata generaatorist vajaminevat reaktiivvõimsuse kogust, vaid näitena osa sellest [36]. Samas, PI-regulaatori võimenduslüli parameetri suurendamine võib omakorda kaasa tuua ülereguleerimise ning kiirema omatoime, mis kokkuvõtlikult resulteerub generaatorite võnkumistega ja üleüldise reguleerimisvõimekuse langusega [37].

Siinkohal on jällegi säärate regulaatorite võimalikke ülesehituse versioone rohkelt. Nende vahel tehtav valik sõltub paljuski eelistustest, kasutatavatest reaktiivvõimsuste jaotamise meetoditest, elektrijaama või tööstusobjekti iseloomust ning üldise juhtimissüsteemi konstrueerija otsustest. Teoreetiliselt on võimalik eelpool kirjeldatud generaatorite reaktiivvõimsuseid fikseeriv regulaator moodustada rohketest komponentidest ja suhteliselt keerukalt. Teisest küljest aga saab vajamineva eesmärgi saavutada ka piisavalt lihtsate lahendustega, mis sisaldavad vähese arvu elemente. [36] Edasises tabelis 2.2 võetakse korra kokku peamised aspektid reaktiivvõimsuste juhtimissüsteemi struktuuride kohta.

Tabel 2.2. Olulisemad erinevused generaatorite reaktiivvõimsuste fikseerimise regulaatori ülesehitustes

Üldine tüüp	PI-regulaator iga generaatori kohta	PI-regulaator mitme generaatori kohta
Põhimõtteline skeem	Joonis 2.4	Joonis 2.5
Reaktiivvõimsuste fiksaatorite asukoht	Enne PI-regulaatorit	Peale PI-regulaatorit
Peamised eelised	Suhteliselt lihtsa ülesehitusega Võimalus muuta fikseeritud reaktiivvõimsusega generaatorid sõltumatuks PI-regulaatorist	Täiuslikum kontrollitavuse tase PI-regulaator ennekõike ainult täpsusreguleerimise jaoks
Peamised puudused	PI-regulaatori toimeulatus väga suur ja nõuab head seadistamist Kontrollitavuse tõstmiseks vaja lisada täiendavad lülid	Pigem keerulisemapoolne PI-regulaatori väljund võib mõjutada generaatoreid ka reaktiivvõimsuste fikseerimise korral

Siinkohal ei saa lõplikult öelda, milline nendest annab kõige optimaalsema resultaadi. Teoreetiliselt kannatab vajaduse korral mõlemat peamist tüüpi konfigurida ja täiendada lisalülidega kuni soovitud eesmärgi saavutamiseni. Juhul kui seda tehakse piisavalt asjakohaselt ja sealjuures

välditakse erinevate piirangute ning olekute dubleerimist ja suudetakse reguleerimise käsklused saata piisavalt otseselt täitevlülidesse ilma muudest komponentidest läbi suunamata, võib lõpptulemus olla põhimõtteliselt sarnane mõne teise versiooniga võrreldes.

Muuhulgas tasub lisada, et üldist generaatorite reaktiivvõimsuste juhtimissüsteemi saab nagu juba eelnevalt korra mainitud üles ehitada ka mitmetele reguleerimismeetoditele tuginedes. Nõnda võib näitena paigaldada ümberlülituse aktiivkadude arvestamise põhimõttest reaktiivkadude omale. Samuti saab teha lahenduse, millega asendatakse eelnevalt nimetatud reaalsed mõõteväärtused fikseeritud parameetritega. Sedamööda tekib generaatorite reaktiivvõimsuste võrdeline reguleerimine, mida annab täiendavalt osakaalude regulaatori sisenditega muuta proportsionaalseks. Lisaks asendades samasugust arvulist väärtust omavad fikseeritud parameetrid erinevatega, tekitatakse generaatorite reaktiivvõimsuste järjestikkuline reguleerimine.

Kokkuvõtlikult on vaja teatud lülide kogumikku, millega eristatakse generaatoreid üksteisest vastavalt sellesse saabuval teabele. Viimane peab veel tajuma, mitut generaatorit reguleeritakse ühtse rühmana ehk lähtuma aktiivsete jaotlalattide hulgast ning vastavalt sellele selekteerima välja sobilikud reaktiivvõimsuse reguleerimise jaoks. Võib mainida, et järgnevas peatükis 3 räägitakse juba täpsemalt ühest konkreetset valitud konstruktsioonist ja toimimisest.

3. REAKTIIVVÕIMSUSTE JUHTIMISE METOODIKA RAKENDAMINE REAALAJASIMULAATORIGA

3.1 Käsitletava elektripaigaldise ülevaade

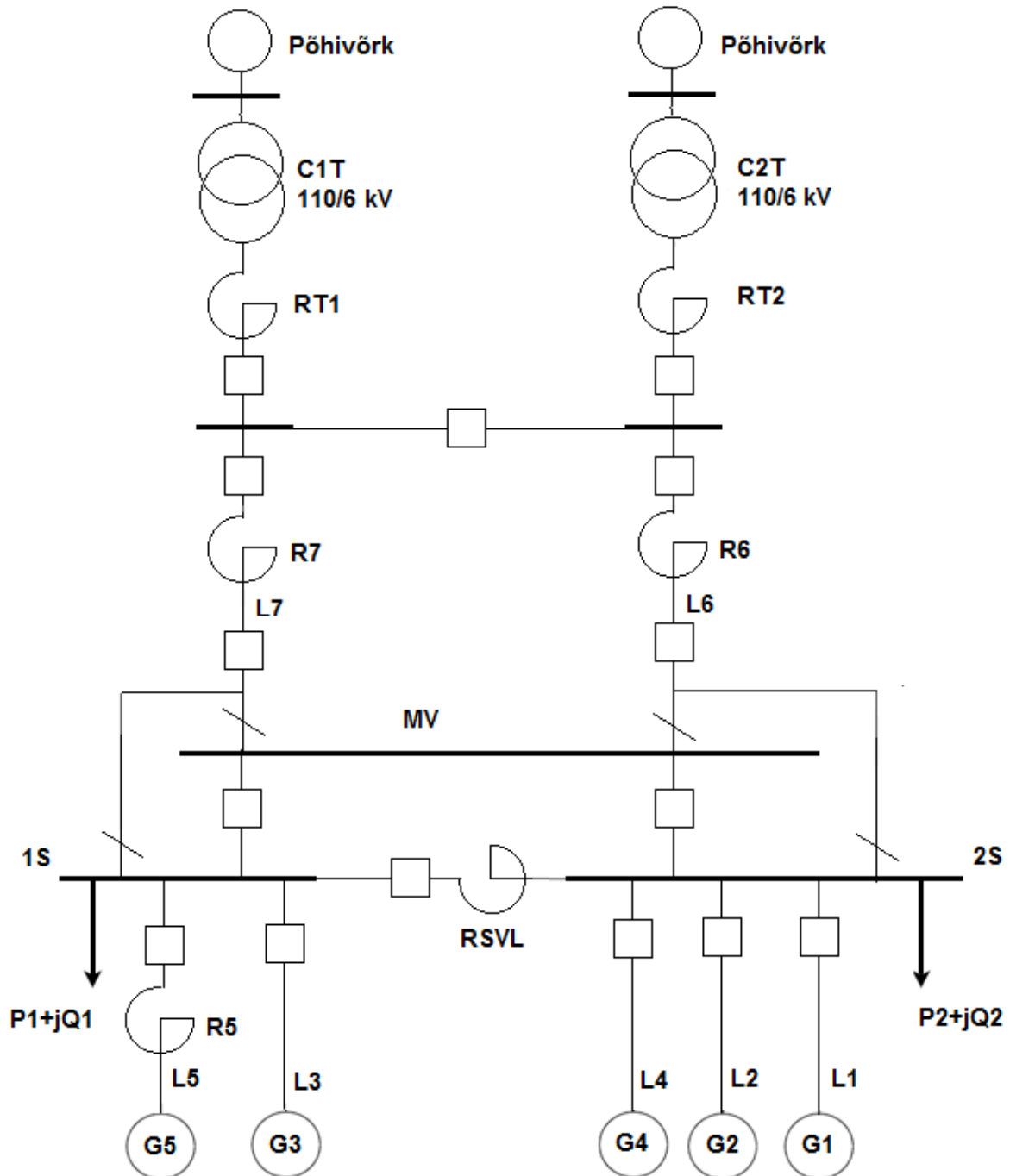
Modelleeritava elektrienergiavõrgu alusena kasutati VKG OÜ Põhja Elektriijaama 110/6 kV ülesehitust, mis teatud üldistustega viidi üle spetsiaalsesse võrguarvutusprogrammi RSCAD. [38] Mainitud modifikatsioonid ei muutnud elektriijaama toimimise põhimõtet, ega selle elektrilist poolt. Ennekõike tähendasid need tarbijate koormuste kokkuvõtmist jaotlate raames ja sarnaselt mõningate süsteemiharude või liiniparameetrite ekvivalenteerimist.

Valitud elektriijaam osutub sobilikuks objektiks, milles generaatorite toodetavat reaktiivvõimsust saab ära kasutada lokaalse tarbimise reaktiivvõimsuse nõudluse katmisel. Nimelt on vastava ettevõtte tegevuse põhivaldkond keemiatööstus. Sellest tulenevalt on vajadus suurema koguse elektrienergia järele ning samuti tekitavad vastupidiselt kohapealsed tööstusprotsessid piisavalt energiat, mida saab edasiselt kasutada generaatorites aktiivvõimsuse genereerimise juures. Jõutrafode sekundaarpoolle paiknevate jaotla lattide küljes olevate generaatorite poolt toodetavat aktiivvõimsust, mis jääb üle lokaalsetest tarbijatest, edastatakse Elering AS omanduses olevate liitumispunktide kaudu põhivõrku. Samamoodi on võimalik vahendada ka reaktiivvõimsust.

Ilma otsese generaatorite reaktiivvõimsuste juhtimiseta on keeruline või teatud vaatenurgast lähenedes isegi võimatu kiirelt reageerida tarbijate reaktiivvõimsuse muutustele. Sedamööda puudub kaasnevalt ka lahendus vähendada jooksvalt generaatorite ja liitumispunkti vaheliste ühenduste energiakadusid ning minimeerida põhivõrku saadetava ja sellest võetava reaktiivvõimsuse koguseid. Viimased mainitud on taolise elektriijaama jaoks ühed peamised põhjused, miks hakata generaatoritega reaktiivvõimsust reguleerima. Teoreetiliselt on vastaval ettevõttel objekti sisemise reaktiivvõimsuse genereerimise ja selle ühendusliinides edastamise optimeerimisega võimalik saavutada põhivõrguga vahetatava reaktiivvõimsuse ja energiakadudega seonduva maksumuse alandamine. Kokkuvõtlikult saab näitena toetada sedamööda rohkem kas või arendustegevust.

Selleks, et spetsiaalse võrguarvutusprogrammiga RSCAD, mis omakorda põhineb reaalaaja simulaatoril RTDS, saaks edasiselt viia läbi erinevaid simulatsioone ja kujundada optimaalne reaktiivvõimsuste juhtimissüsteem, osutus esmaselt vajalikuks modelleerida mainitud elektriijaama elektrivõrk. Täpsemalt kuulusid sinna kaks põhitrafot C1T ja C2T ning nende sekundaarpoolte jaotlates olevad generaatorid G1....G5. Viimased asetsesid kindlates rühmades ja sõltuvalt asupaigast olid ühendatud eraldi paiknevatele sektsioonidele tähistega 1S või 2S ning (vajadusel)

ühtsele möödaviiklatile tähistusega MV. [38] Joonisel 3.1 on elektrivõrgu põhimõtteskeem. Eling AS poolseid võimsuslüliteid trafode C1T ja C2T primaarpoolel pole kujutatud, kuna neil puudub otsene mõju edaspidiselt kirjeldatavale generaatorite reaktiivvõimsuste juhtimissüsteemile. Nende toimimisest on võimalik saada teavet näitena nimetatud trafode kaudu liikuva aktiiv- või reaktiivenergia muutustest.



Joonis 3.1. Modelleerimisel kasutatud VKG OÜ elektrijaama elektrivõrgu ülevaade

Analüüsitava ühendusvõrgu liinide parameetrid modelleeriti arvutusprogrammis RSCAD PI-aseskeemidena. Reaktoreid käsitleti kui induktiivelemente. Siinkohal tasub lisada, et need on

vajalikud generaatorite ligiduse tõttu tekkivate kõrgete lühisvoolude vähendamise jaoks. Samas, reaktorite olemasolu tähendab omakorda vastavate elementide poolt tarbitavaid reaktiivvõimsuse koguseid ja voolu muutuste mõju piiramist.

Koormuseid vaadeldi mõlema sektsiooni kohta eraldi ja need eeldati sisaldamas tarbijatega ühenduvatel liinidel asuvaid reaktoreid ning liinide takistusi summeerituna. Samuti võeti kahel sektsioonil väljuvaid koormuseid kompleksena, sisaldamas väljuvaid liine teistesse alajaamaga seotud piirkondadesse. Ülekandevõrgu ehk Elering AS 110 kV nimipingega elektrivõrku iseloomustavad takistused asendati ekvivalentsete parameetritega.

Generaatorite juurde kuuluvad ergutussüsteemid konstrueeriti modelleeritavas elektrivõrgus nendesse kuuluvate lülide parameetrid arvesse võttes. Samamoodi on ümberviidud arvutusprogrammi erinevad generaatorite üle- ja alapinge, stabilisaatorite, turbiinide regulaatorite ning muude täiendavate seadmete plokid. Käesolevalt ei kasutatud RSCAD keskkonnas olemasolevaid komponentide kogumeid ehk mooduleid, vaid konstrueeriti need omapoolselt vajaminevatest elementidest. Järgnevates tabelites 3.1, 3.2 ja 3.3 on toodud modelleeritud trafode, liinide ja generaatorite põhiparameetrid.

Tabel 3.1. Elektriijaama trafode C1T ja C2T põhiparameetrid [38]

Nimivõimsus, MVAR	20
Ülempinge, kV	140
Alampinge, kV	10,5
Lühistakistus, %	40
Lülitusgrupp	YNd11
Rauaskaod, kW	33,5
Vaseskaod, kW	50

Tabel 3.2. Elektriijaama generaatorite tunnusväärtused [38]

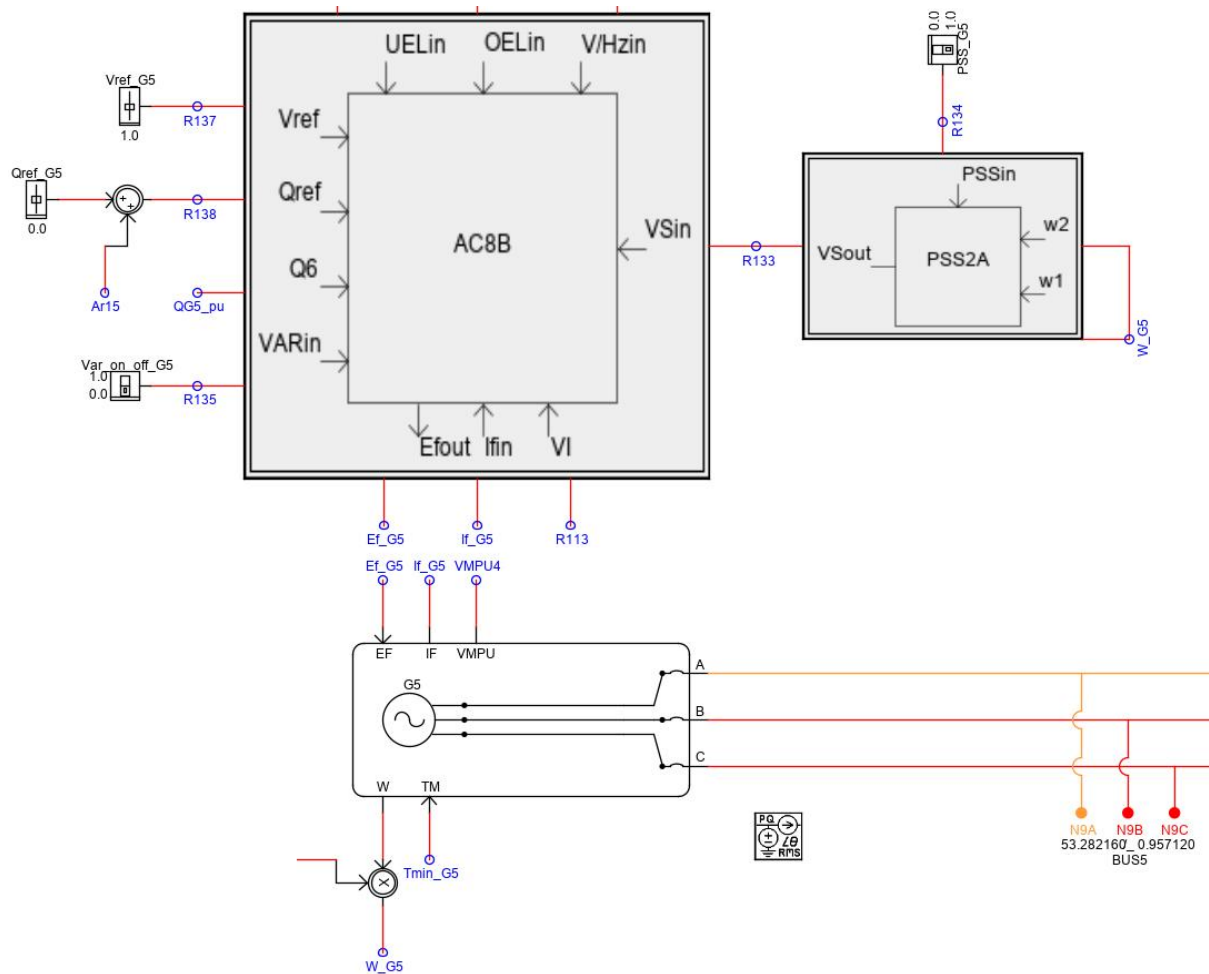
Generaator	Nimivõimsus, MVA	Nimipinge, kV	Ülimööduv takistus, s.ü.	Mööduv takistus, s.ü.	Sünkroon-takistus, s.ü.	Ergutus-süsteem
G1	250	10	0,31	0,11	2,89	AC6B
G2	150	10	0,27	0,33	1,00	ST2A
G3	100	10	0,11	0,12	1,06	DC3A
G4	100	10	0,35	0,45	1,11	DC3A
G5	100	10	0,32	0,10	1,17	AC5B

Tabel 3.3. Elektriijaama elektrivõrgus kasutatud liinide arvulised suurused [38]

Liin	R, Ω	X, Ω	$C, \mu F$	Reaktor	$X_{reaktor}, H$
L7	0,0077	0,011	0,222	R7	0,0111
L6	0,0060	0,011	0,152	R6	0,0111
L5 (generaatoripoolne)	0,0045	0,014	0,793	R5	0,0012
L5 (jaotlapoolne)	0,0044	0,066	0,523		
L4	0,0092	0,034	0,333		
L3	0,0065	0,067	0,324		
L2	0,0099	0,034	0,863		
L1	0,0075	0,003	0,623		
SVL				RSVL	0,0012

Lähtuvalt sellest, et alusena võetavat elektriijaama kasutatakse ennekõike reaktiivvõimsuste reguleerimise meetodika katsetamisel, üldistatakse ka selles olevate tarbijate koormuskestvuskõverad. Nõnda eeldatakse reaktiivvõimsuse nõudluse jäämine mõlema latiseksiooni raames maksimaalselt alla suuruse 15 Mvar, mis on reaalsele oludele vastav väärtus [38]. Samuti arvestatakse trafode astmelülite omatoimeajaga, mistõttu esinevad tõenäoliselt olukorrad, milles jaotla latipinged saavutavad lubatava alam- või ülempiiri ning generaatorite reaktiivvõimsuse reguleerimine peab jääma ooteseisundisse. Teoreetiliselt toodavad generaatorid tarbijate nõudlusest rohkem reaktiivvõimsust, kuna osa sellest kaob elektrivõrgu induktiivsetes elementides nagu reaktorid ja trafod. Lisaks määrab ka sektsiooni pinge muutumine omaltpoolt reaktiivvõimsuse genereerimise ulatuse.

Joonisel 3.2 on näitena esile tõstetud generaator G5 modelleerimise üks osa. Nõnda on näha peale generaatorit kujutava lüli veel ergutusüsteemi AC5B, mis sisaldab eneses rohkelt erinevaid regulaatoreid ja ühendusi. Samuti on veel stabilisaator PSS2B, milles samamoodi asetsevad spetsiaalsed võimendus-, diferentsiaal- ja integraatorlülid. Käesolevalt nende täpsemal ülesehitusel ei peatuta, kuna ennekõike on tegemist alusega, mille peale rajatakse üldisem juhtimissüsteem. Mõistetavalt peab säärane põhi olema võimalikult hästi toimiv, et edasiselt saaks seda optimaalselt rakendada. Siinkohal tasub lisada, et selle tõepärasuses veenduti ning edasistes punktides välja toodud tulemused samamoodi kinnitavad vastavat väidet. Täiendava selgitusena tuleb mainida, et vastaval joonisel 3.2 asuvasse sisendisse Ar15 saadetakse generaator G5 reaktiivvõimsuse regulaatori väljund ehk selle kaudu toimub VAR-regulaatori sätteväärtus muutmine.



Joonis 3.2. Generaator G5 (joonise alumisel poolel) ja selle lisakomponendid ergutusüsteem AC5B ning stabilisaator PSS2B (joonise ülemisel poolel) kujutatuna võrguarvutusprogrammis RSCAD

3.2 Reaalajasimulaatori ülevaade

Reaalajasimulaator on Kanada ettevõttes RTDS Technologies väljatöötatud riistvara, millega on võimalik elektrisüsteemi reaalajas simuleerida. See on oma olemuselt elektromagnetliste protsesside arvutamiseks mõeldud seade, mille arvutusmeetod põhineb Dommeli algoritmil ja integreerimisest tuntud trapetsi reeglil. Arvutuse tulemusel koostatakse igale ajahetkele uus lahend. Lisaks on võimalik RTDS-i kasutada HIL (*Hardware-in-the-loop*) testimiseks ehk sellega saab ühendada erinevaid seadmeid, mida enne elektrivõrku paigaldamist uurida. [39]

Reaalajasimulaator ehk RTDS (ing.k *Real-Time Digital Simulator*) kuulub ühe osana elektrisüsteemide laboris olevatesse õppe- ja teadustöö tegemiseks soetatud seadmete kogumisse. Joonisel 3.3 on näha keskel RTDSi, sellest paremal on stand faasimõõteseadmete ja GPS-kellaga, vasakul on stand, kus on tööstuskontroller ja sünkroongeneraatori erguti. Lisaks nendele on RTDSil optikaühendus releekatiselaboriga, kus on võimalik uurida releekaitsega seonduvat. Näitena on

laboris eelnevalt kasutatud RTDSi nii faasimõõteseadmete, releede, ergutusregulaatorite kui ka kontrollrite uurimiseks.



Joonis 3.3. Tallinna Tehnikäikooli Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi elektrisüsteemide labor. TTÜ elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi elektrisüsteemi laboris olev RTDS koosneb kahest stendist ehk rack'ist, millest mõlemad sisaldavad nelja protsessorikaarti ja GTWIF kaarti. Viimaste ülesandeks on simulatsiooni koordineerimine ehk protsessorkaartidele simulatsiooni läbiviimiseks vajalike käskluste edastamine. Protsessorkaardid on ühe stendi lõikes omavahel ühendatud optikafiibritega, samas stendide vahelised riistvaralised ühendused puuduvad. Analoo sisendite ja väljundite jaoks on kasutusel vastavalt GTAI ja GTAO kaardid. Digitaalsignaali sisendite ja väljundite jaoks on olemas omakorda GTDI ja GTDO kaardid. Erinevate sideprotokollide nagu energeetikas kasutatavate IEC 61850 GOOSE, IEC 60870-5-104 ja IEEE C37.118.2 andmete edastamist võimaldab GTNETx2 kaart.

Igal protsessorkaardil, millede eesmärk on teostada simulatsioonis vajalikud arvutused, on kaks RISC tüüpi mikroprotsessorit. Programmis RSCAD on võimalik määrata, mis on iga protsessorkaardi eesmärk. Võimalike variantidena on panna protsessor arvutama kontrollkomponente nagu loogika-

ja juhtimisplokid või elektrisüsteemi komponente nagu näitena trafod, elektriliinid ja generaatorid. [40] Üks protsessor on aga igas simulatsioonis alati määratud süsteemi talitluse ehk *Network Solution*'i arvutamiseks. Mõned mainitud komponentidest on esile tõstetud joonisel 3.4.



Joonis 3.4. RTDS (vasakul), GTWIF kaart (paremal üleval) ja protsessorkaart (paremal all)

RTDSiga töötamiseks on loodud tarkvara RSCAD ja seda kasutatakse elektrisüsteemi mudeli koostamisel ning selle simulatsiooni juhtimisel. Oma olemuselt sarnaneb see PSCADiga ning modelleeritav elektriskeem pannakse kokku valikus olevatest komponentidest nagu seda tehakse ka teistes võrguarvutustarkvarades. Uurida on võimalik kõike elektrivõrkudega seonduvat, näitena sünkroongeneraatoreid, HVDC ja FACTS seadmeid, kaitsereleede ja faasimõõteseadmete algoritme, nii koormus- kui ka mõõtetrafosid, elektriliine, maakaableid ja sarnaseid elektrisüsteemis olevaid seadmeid ning komponente.

3.3 Reaktiivvõimsuse juhtimissüsteemi konstruktsioon

Käesoleva modelleerimise käigus võeti üheks põhieelduseks kõigi valikus olevate seadmete ehk generaatorite G1....G5 reaktiivvõimsuste eraldiseisev juhtimine. Samuti pidi olema võimalik seda teha komplekselt ehk kõikide generaatoritega üheaegselt. Nõnda osutus vajalikuks lisada nendest igale seadmele VAR-regulaator. Vastava seadme ülesehitus on kõigil viiel generaatoril samasugune, kuid selles olevate võimendus- ja integraatorlülili ning fikseeritud piirajate parameetreid sobitati masinate ergutussüsteemidega.

Lisaks lähtuti vajadusest optimeerida toodetava reaktiivvõimsuse kogused sedamoodi, et lõpptulemusena minimeeritakse vaadeldava elektrivõrgu energiakaod. Seda tehakse kahel meetodil. Esmaselt on vajalik hoida ülekandetrafoode primaarpoolelt sekundaarpoolele või vastupidi liikuv reaktiivenergia hulk suhteliselt väikese suurusega ehk minimeeritakse reaktiivvõimsust liitumispunktis. Teisena on võimalik vähendada aktiivvõimsuskadusid generaatoreid jaotlalatiga ühendavatel liinidel. Nõnda tasub ennekõike koormata ehk reaktiivvõimsust tõsta nendel generaatoritel, millel on vastavad liinid madalamate takistustega või aeglasemalt muutuva aktiivvõimsuskao suhtelise juurdekasvuga. Muuhulgas võtab säärane selektiivsus ühest küljest arvesse veel liinidel paiknevaid reaktoreid, mis iseenesest tarbivad teatud koguse reaktiivvõimsusest. Samuti tähendas selline otsus ühtse juhtimissüsteemi konstrueerimist, mis reguleeriks iga seadme VAR-regulaatorites kindlat sätteväärtust, et hoida generaatorites sobivat reaktiivvõimsust.

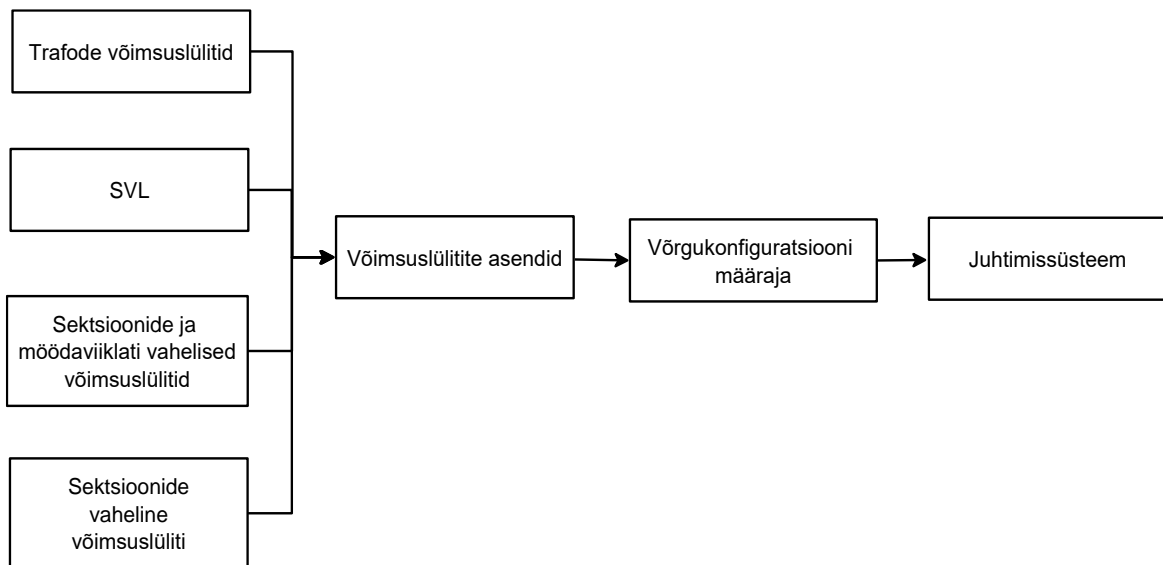
Mitmete generaatorite reaktiivvõimsuse üheaegne või samas ajaperioodis reguleerimine nõuab veel võimalike võrgukonfiguratsioonide ehk ennekõike võimsuslülitite asenditega arvestamist. Nõnda osutub olulisena teha kindlaks, millised generaatorid on teatud lattidele ühendatud, kas trafod on paralleeltoitel või mitte või asetsevad kõik võrgu osad kokku liidetuna. Sedamööda tekitavad muutused võrgusisestes energiavoogude liikumistes omakorda vajaduse võrgukadusid minimeerides korraka reguleerida ühe või paari generaatori asemel eraldi suuremat seadmete hulka. Säärasel juhul tuleb arvestada näitena ühtlase reguleerimiskiiruse saavutamise ja seega täiendavalt muuta iga erinevale reaktiivvõimsuse regulaatorile saadetavaid parameetreid, mis määravad ära mainitute reaktiivvõimsuse tõstmise või langetamise järsaku ehk aja, mille jooksul eesmärk saavutatakse.

Erinevate generaatorite poolt toodetavate reaktiivvõimsuste suuruste omavahelise jaotumise reguleerimine eeldab veel piisavalt täpse ja selleks vajaliku teabe olemasolu ning kättesaadavust. Siinkohal lähtutakse kahest peamisest sisendite rühmast, millest tulenevat informatsiooni omavahel kombineerides reguleeritakse generaatorite reaktiivvõimsust ühtse juhtimissüsteemiga. Võrgukonfiguratsiooni ja trafode ning generaatorite ühenduste kohta andmete saamisel kasutatakse järgnevat modelleeritava elektrivõrgu paikades asuvaid võimsuslülitid:

- Trafo C1T sekundaarpoolel;
- Trafo C2T sekundaarpoolel;
- SVL ehk kahe trafode C1T ja C2T sekundaarpoolte vaheline;
- Trafo C1T ja lati 1S vaheline (normaalolukorras lahküliti kaudu ühendatud latile 1S);
- Trafo C2T ja lati 2S vaheline (normaalolukorras lahküliti kaudu ühendatud latile 2S);

- Lati 1S ja möödaviiklati vaheline;
- Lati 2S ja möödaviiklati vaheline;
- Lattide 1S ja 2S vaheline;
- Generaatoritel G1....G5.

Ennekõike selgitatakse eelnevate üksuste olekute järgi välja, milliste trafode primaarpoolel mõõdetavatest reaktiivvõimsustest üldine reguleerimissüsteem lähtub. Samuti sõltuvad nendest, missuguste generaatoritega on võimalik võrgus reaktiivvõimsust toota. Lisaks annavad need teavet olukorrast, milles mõlemad seksioonid on kokku ühendatud ning sedamööda omavad kõik nende külge kinnituvad generaatorid teoreetiliselt võimekust põhivõrgust võetava või sinna edastatava reaktiivenergia minimeerimiseks. Joonisel 3.5 on ära toodud kokkuvõtlik skeem, mille kaudu edastatakse generaatorite reaktiivvõimsuse regulaatoritele teave seksioonide kokku ühendamise kohta.



Joonis 3.5. Võimsuslülite asendeid arvesse võtva regulaatorlülituse põhimõtteskeem

Sellest tulenevalt seadistatakse ära, kas on vaja lähtuda kõigi viie generaatori liinikadudest ühtselt, mitte enam kahest seksioonist eraldi. Juhul, kui võimsuslülite asendid ei vasta teatud kombinatsioonidele, järeldatakse, et seksioonid on eraldatud. Samamoodi otsustab võrgukonfiguratsiooni määraja selles paiknevate loogikalülide põhjal, kas mõlemad trafod või ainult üks nendest on generaatoritega ühendatud. Muuhulgas edastatakse mainitust vajadusel käsklused, et tekkinud situatsioon nõuab ümberlülitumist teise trafo primaarpoolelt edastavale mõõtetulemusele.

Generaatorite reaktiivvõimsuste regulaatorite juhtimise jaoks võetakse vajaminev informatsioon järgnevatest mõõtepunktidest:

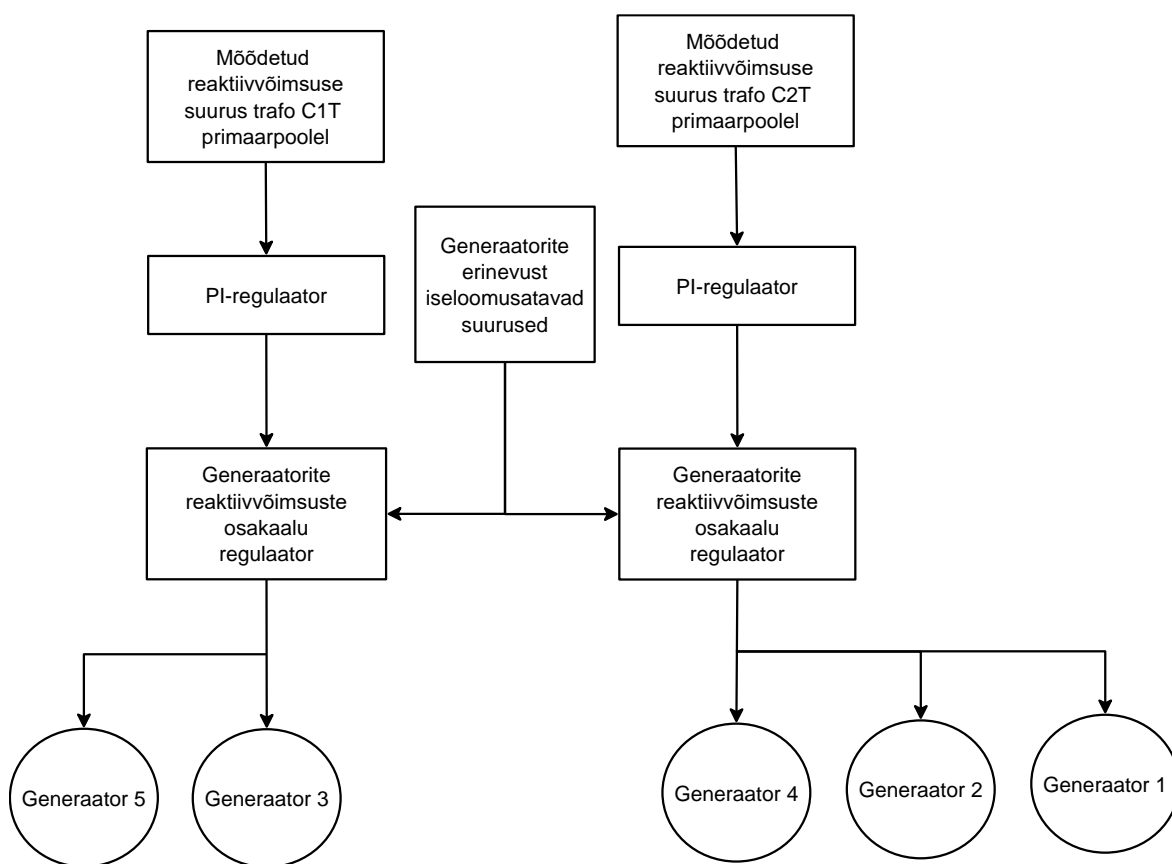
- Trafo C1T primaarpoolel mõõdetavast reaktiivvõimsusest;
- Trafo C2T primaarpoolel mõõdetavast reaktiivvõimsusest;
- Generaatorite G1....G5 klemmidel mõõdetavast reaktiivvõimsusest;
- Generaatorite G1....G5 klemmidel mõõdetavast aktiivvõimsusest;
- Liinide L1....5 jaotlapoolses otsas mõõdetavast aktiiv- ja reaktiivvõimsusest;
- Generaatorite G1....G5 klemmipinge;
- Lattide 1S ja 2S pinge suurusest.

Esimese kahe järgi määratakse ära generaatorite poolt toodetav vajaminev reaktiivvõimsus, mille jaotamine seadmete vahel on reaktiivvõimsuste regulaatori peaeesmärk. Ülejäänud mõõdetavaid suuruseid kasutatakse generaatorite väljastatavate reaktiivvõimsusete lubatavates piirides hoidmisel, seadmete reguleerimise võimalikult optimaalse järjekorra tekitamisel ja generaatorite ning elektrivõrgu vahelise ühenduse olemasolu kinnitamisel. Sealhulgas annavad saadavad pinge mõõteväärtused regulaatorite üldisele juhtimissüsteemile teavet vajadusest lõpetada seadmetel reaktiivvõimsuse juurde tootmine või seda hoopis vähendada. Generaatorid ei tohi reaktiivvõimsust enam tõsta, kui lubatud klemmipinge ülempiir on saavutatud ja seetõttu rakendatakse regulaatorite juhtimissüsteemi poolt kas reaktiivvõimsuse genereerimise piiramist või alla reguleerimist.

Käesolevalt rakendatakse sellist üldist generaatorite reaktiivvõimsuste regulaatorit, mis omab reaktiivvõimsuste fiksaatoreid ehk osakaalude regulaatoreid peale PI-lülisid. Lähtuvalt vastavast otsusest mõjutavad viimased sõltuvalt võrgukonfiguratsioonist mitut generaatorit korraga ning tekitavad vajaduse piisavalt efektiivselt seadistada PI-regulaatori ja lisalülide parameetrid mainitu minimeerimiseks. Säärane tegevus osutub oluliseks, kuna osakaalude fiksaatoris kasutati ratsionaalsemat integraatoritel põhinevat struktuuri. Siinkohal puudusid otsesed põhjused mõne muu ülesehituse eelistamiseks või valitu kõrvalejätmiseks. Pigem näis keerukam struktuur andvat suurema paindlikkuse, kontrollitavuse ja olevat rohkem sobilikum arendustegevuseks ning erinevate katseseeriade läbiviimiseks. Teoreetiliselt on hilisemalt võimalik konstrueeritud lahendus ümber kujundada teistlaadse ülesehitusega versiooniks, kuna enamuses üldisest juhtimissüsteemist jääb samasuguseks.

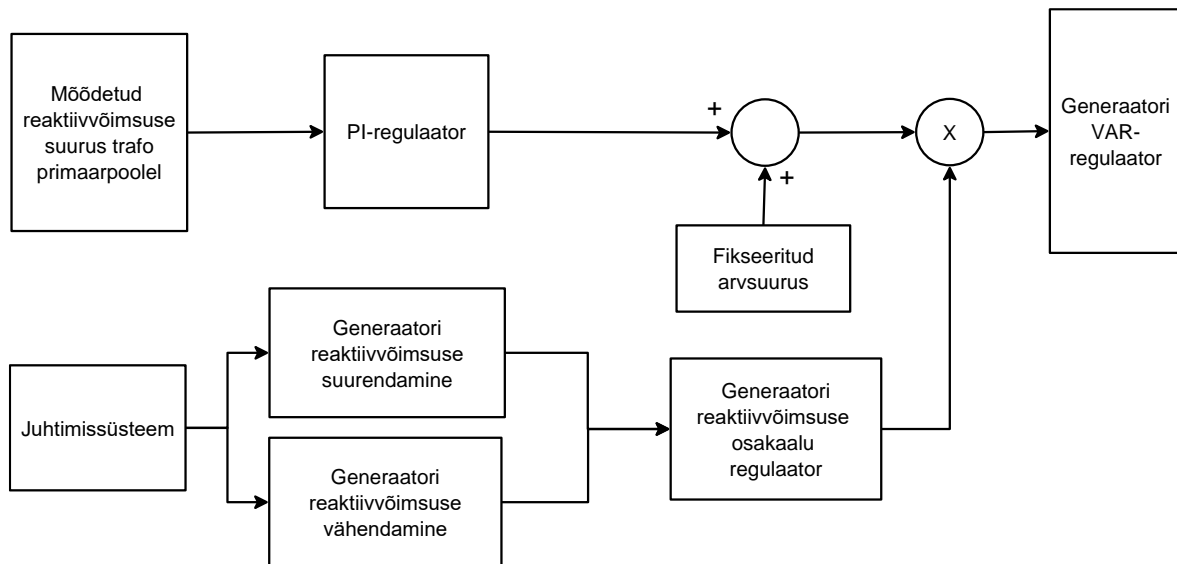
Nõnda, lähtuvalt eelnevatest väidetest, toimub erinevate generaatorite ergutussüsteemidele vajalike käskluste edastamine ja sedamööda nende poolt toodetava reaktiivvõimsuse suurendamine või vähendamine järgnevalt, sealjuures võttes arvesse ka eelpool kirjeldatud lülidest

saabuvat teavet. Trafode C1T ja C2T primaarpoole mõõteväärtustele põhinedes edastatakse PI-regulaatorist väljuv numbriline suurus edasi iga generaatori reaktiivvõimsuse osakaalu määravasse lülisse. Samuti tuleb viimasesse ka teave eelnevalt mainitud liinidelt tähistusega L1, L2, L3, L4 ja L5, mis määravad ära, kas kindla generaatori väljastatavat reaktiivvõimsust reguleeritakse. Juhul, kui seda tehakse, edastatakse saadud arvuline suurus juba generaatori VAR-regulaatorile ehk põhimõtteliselt seadistatakse, millist reaktiivvõimsuse väärtust peab vastav seade hoidma. Kokku on kasutusel kaks erinevat PI-regulaatorit ehk igale trafodele eraldi. Sellele järgnevad generaatorite reaktiivvõimsuste osakaalu määrajad, mis on toodud joonisel 3.7. Kirjeldatu võtab kokku joonisel 3.6 olev plokkskeem. Samuti nähtub joonisest 3.6 täpsemalt, kuidas normaalolukorras (seksioonid 1S ja 2S lahus) on generaatorid trafodega ühendatud



Joonis 3.6. Generaatorite reaktiivvõimsuse juhtimise põhimõtteskeem

Joonisel 3.7 on toodud nii PI-regulaatori ja generaatorite reaktiivvõimsuse osakaalu määraja ehk reaktiivvõimsuse fiksaatori ülesehitus. Siinkohal tuleb mainida, et viimased on lisatud igale generaatorile, kuid PI-regulaatorid võivad olla ühised. Seda sõltuvalt alusena kasutatava elektrivõrgu võimsuslülitite asendist ehk tuginedes eelpool paikneval joonisel 3.5 nähtavast lülitusest saabuval teabele. Nõnda näitena ühe trafo väljalülitumise tagajärjel reguleeritakse kõiki generaatoreid teise trafo primaarpoolelt tulevate mõõteandmete järgi.



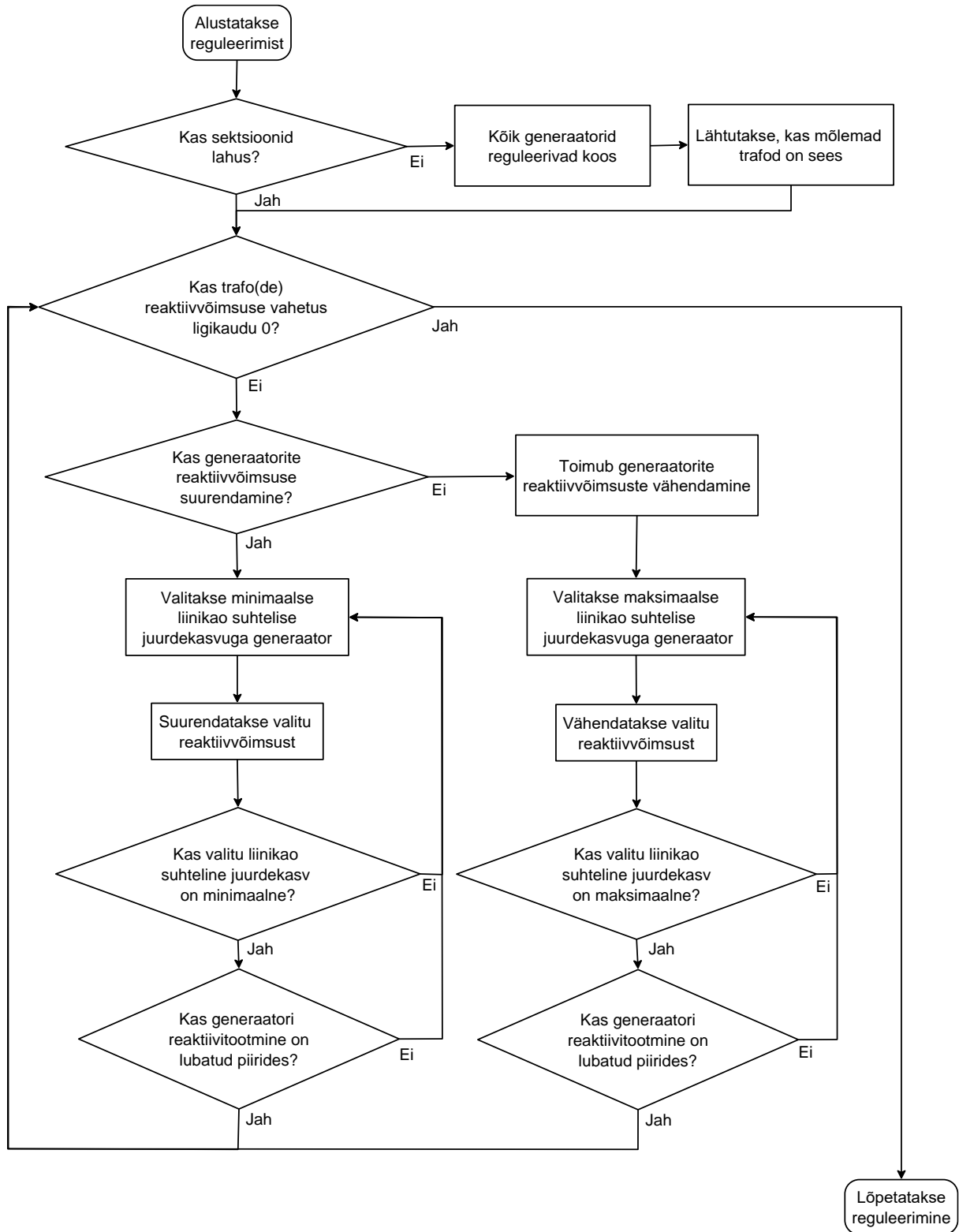
Joonis 3.7. PI-regulaatori ja generaatori reaktiivvõimsuse osakaalu määraja ülesehitus

Vaadeldava joonise 3.7 ülalpool paikneb PI-regulaator, mis koosneb proportsionaalsest ja integraalsest lülis. Nendest nimetatud lülidest väljastatav arvuline suurus summeeritakse. Seejärel suunatakse saadud tulem edasi ning tõstetakse või langetatakse vastavalt iga generaatori reaktiivvõimsuse osakaalu regulaatorist, mis asetseb joonise 3.7 alumisel poolel, tulenevale väärtusele. Reaktiivvõimsuse osakaalu regulaator koosneb omakorda integreerivast lülis, millele vastavalt juhtimissüsteemi ehk generaatorite reaktiivvõimsuse üleüldise regulaatori poolt edastatud teabele antakse selle arvulist suurust kasvatav või kahandav käsklus. Seejärel liigub saadud tulem edasi generaatoritele, mis hakkavad toimima etteantud toodetava reaktiivvõimsuse juures ehk määratakse igale nendest kindel genereeritava reaktiivvõimsuse sätteväärtus.

Juhtimissüsteemi toimimise põhimõtet ilmestab järgnev joonis 3.8. Esmaselt lähtutakse võimsuslülitite asenditest vaadeldavas elektrivõrgus ning sellest tulenevalt määratakse ära, millised PI-regulaatorid toimivad ning millises järjekorras edastatakse teavitused edasistele lülidele. Seejärel sõltub reaktiivvõimsuse reguleerimine kindla trafo primaarpoolel mõõdetava reaktiivvõimsuse arvulisest suurusest. Ennekõike seatakse eesmärgiks, et selle väärtus peab olema võimalikult nullilähedane. Samas on vajaduse korral võimalik kasutada teisi reaktiivvõimsuse sättesuuruseid. Nõnda vastavalt olukorrale suurendatakse või vähendatakse teatud generaatorite reaktiivvõimsust ja seda tehes valitakse kas kõige väiksemate või suuremate liinipõhiste väärtustega seade.

Esimene situatsioon esineb genereeritava reaktiivvõimsuse tõstmise, teine aga langetamise juures. Samuti võetakse arvesse iga seadme reaktiivvõimsuse tootmise võimalik vahemik. Juhul, kui see ületab maksimaalse reaktiivvõimsuse ülempiiri, siis vastav generaator selle üleüldise suurendamise juures enam ei osale ja seda piiratakse juhtimissüsteemi valikutes.

Olukorras, milles väheneb elektrivõrgu sisemine tarbitav koormus või ka teatud generaatorite poolt toodetav aktiivvõimsuse määr, kaasatakse eelpool kirjeldatud seade uuesti reguleeritavate hulka. Generaatorite reaktiivvõimsuse reguleerimine lõpetatakse, kui saavutatakse kindla trafo primaarpoolel vajaminev reaktiivvõimsuse määrdetava suurus.



Joonis 3.8. Elektrivõrgu reaktiivvõimsuse ühendusliinide määrdetavate järgi juhtimise tööpõhimõte

Muuhulgas võib kasutada generaatorite liinipõhiste väärtustega järgi reguleerimise piiramist iga generaatori lubatud reaktiivvõimsuse, mis sõltub toodetavast aktiivvõimsusest, ülempiirist näitena 70% saavutamisel. Seejärel tõstetakse regulaatori kaudu ka teiste võimalike töös olevate ja valiku alla kuuluvate generaatorite reaktiivvõimsuste suurust eelpool mainitud piirini. Juhul, kui kõik teatud trafo kaudu edastatava reaktiivvõimsuse minimeerimisse kaasatud generaatorid on vastava piirsuuruse saavutanud, hakatakse nende poolt toodetavat reaktiivvõimsust tõstma proportsionaalselt või võrdeliselt kõikidel sobivatel seadmetel. Ennekõike tähendab säärane tegevus mittelubamist generaatoril jõuda koheselt toodetava reaktiivvõimsuse ülempiirini, olgugi et näitena võib vastaval reguleerimise alusena võetud generaatoril liinipõhised väärtused olla teistega võrreldavatest madalamad. Nõnda tõstetakse kokkuvõttes elektrivõrgu üldist ja samuti generaatorite stabiilsust ning jäetakse väiksemate koormuste korral seadmetele teatud reguleerimisreserv.

Seega võetakse käesoleval juhtumil iga generaatori reaktiivvõimsuse suurendamise alusena nende ja vastavalt kas siis sektsioon 1S või 2S vahel olevas ühendusliinis tekkivad aktiivvõimsuskad või nende suhtelised juurdekasvud. Lisaks arvestatakse sellega, mitu generaatorit kindla trafo kaudu edastatavat reaktiivenergiat kompenseerib ja samuti võimsuslülitite asendist tuleneva võrgukonfiguratsiooniga, ning tehakse kindlaks, milliste generaatorite liinide mõõteandmeid üldse võrreldakse. Kasutusel on nii minimaalsete kui ka maksimaalsete väärtuste määravad.

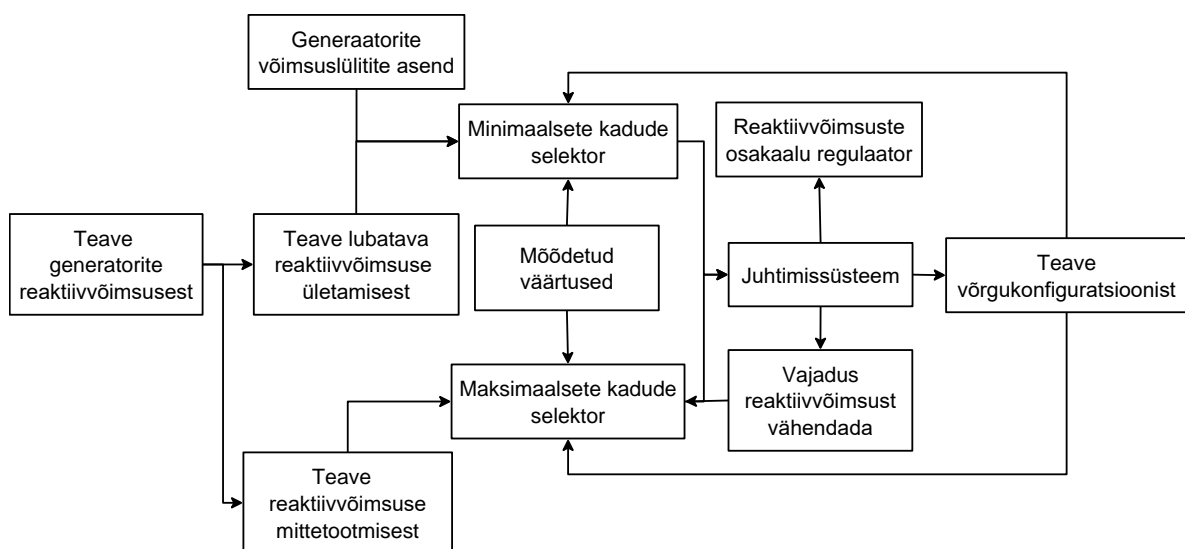
Minimaalne mõõteväärtus valitakse kõigi vastava stsenaariumi raames reguleeritavate generaatorite liinide kohta edastatava teabe vahel. Samuti lähtuvalt sellest, kas generaator on võimsuslülitite kaudu elektrivõrguga ühendatud ja ei ole saavutanud reaktiivvõimsuse ülempiirist paika seadistatud suurust 70%. Juhul, kui üks nendest kahest täpsustusest osutub mitteõigeks, siis vastav seade reaktiivvõimsuse ülesreguleerimisest välistatakse. Muuhulgas võetakse arvesse ka olukorda, milles asetsevad sektsioonid on lahus või mitte. Sõltuvalt sellest valitakse minimaalset mõõteväärtust iseloomustav suurus kas iga lati kohta eraldi või suunatakse kõik viis generaatorit ühtsele selektorile.

Samalaadne lahendus on maksimaalse mõõteväärtuse väljaselgitamisel. Peamine erinevus seisneb selles, et olukorras, milles teatud generaator otseselt reaktiivvõimsust ei tooda, kõrvaldatakse seda iseloomustav sisend maksimaalset liini mõõteväärtust valivast lülitusest. Säärane tegevus võimaldab generaatorite reaktiivvõimsuse tootmise vähendamises esmaselt langetada suuremas koguses reaktiivenergiat genereerivate üksuste võimsust.

Pärast seda, kui kõik teatud situatsioonis arvesse võetavad generaatorid on saavutanud reaktiivvõimsuse lubatavast ülempiirist 70%, enam seadmete liinide mõõteväärtuseid omavahel ei

võrrelda ja lülitatakse ümber kõigi valikus olevate seadmete üheskoos reguleerimisele. Siinkohal lähtutakse samamoodi kehtivast võrgukonfiguratsioonist ja töös olevatest generaatoritest. Olukorras, milles teatud generaator saavutab maksimaalse lubatava reaktiivvõimsuse ülempiiri, selle suurendamine lõpetatakse. Samuti peab juhtimissüsteemil olema võimekus hoida mainitud väärtust, seda ka 70% lubatavast korral. Ennekõike läheb säärast võimalust vaja teiste generaatorite võnkumiste stabiliseerimisel.

Tarbitava ja nõutava reaktiivvõimsuse vähenemisel langetatakse ühtselt kõigi, sõltuvalt situatsioonist, valikus olevate seadmete toodetavat reaktiivvõimsust, kuni üks nendest genereerib seda alla 70% lubatavast piirmäärast. Seejärel rakendub alla reguleerimisel jällegi maksimaalse liini mõõteväärtuse selektor ning vähendab järgmisena kõige suuremat reaktiivvõimsuse suurust omava seadme võimsust. Juhul, kui koormus hakkab kasvama, siis esmalt tõstetakse nende generaatorite reaktiivvõimsust, mis pole veel saavutanud 70% lubatavast reaktiivvõimsuse piirväärtusest. Kokkuvõtlikult on eelnevalt kirjeldatud meetodika esitatud joonisel 3.9

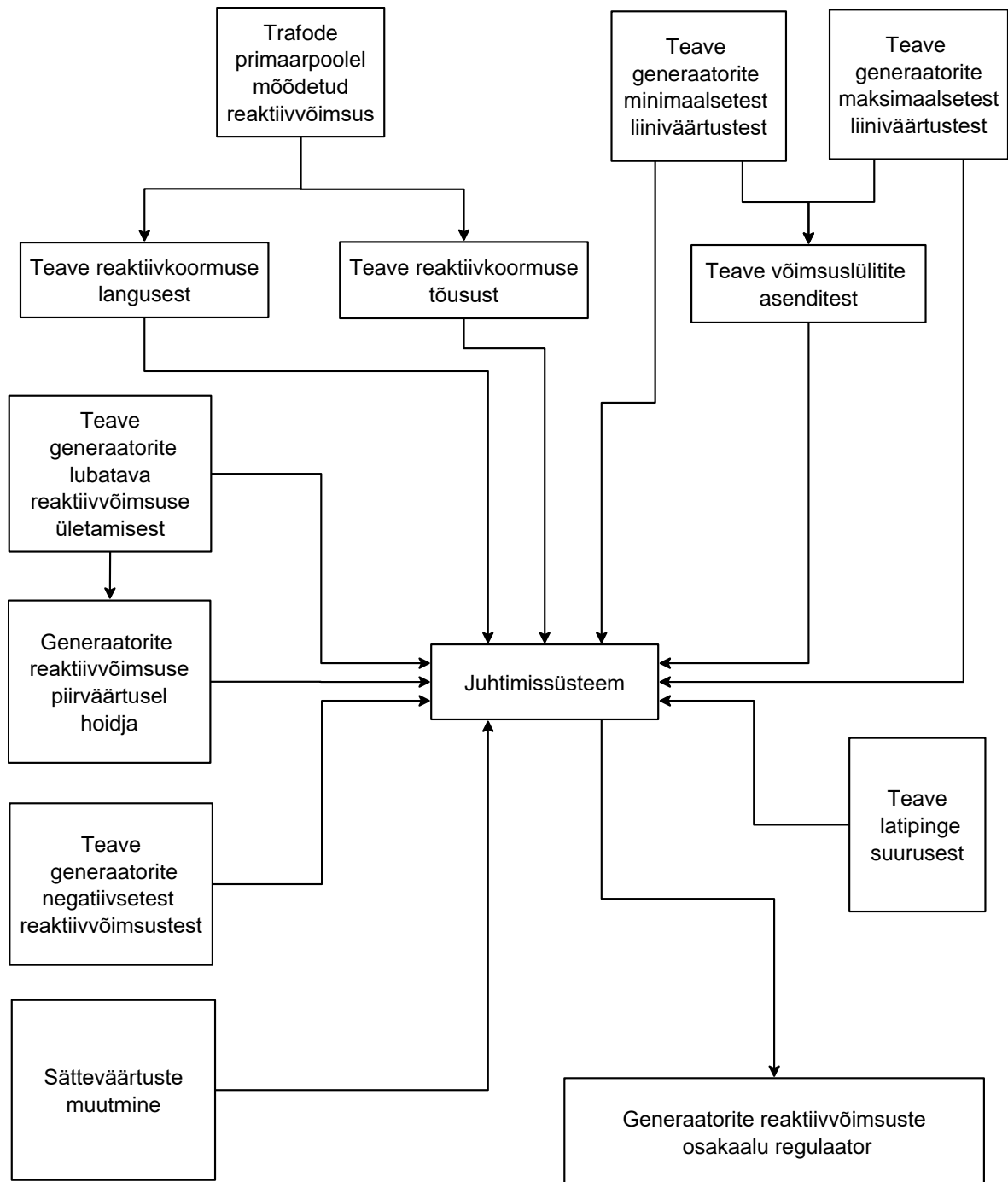


Joonis 3.9. Generaatorite reaktiivvõimsuste tõstmise või langetamise aluste üldpõhimõte

Lähtuvalt sellest, kas reguleeritakse generaatorite reaktiivvõimsust eraldi või koos, seadistatakse ümber ka reaktiivvõimsuse osakaalu regulaatori lülis olevad parameetrid, mis määravad ära reaktiivvõimsuse tõstmise või langetamise kiirused iga seadme kohta. Seda tehes on võimalik säilitada suhteliselt ühtlane generaatorite reguleerimiskiirus.

Lisaks põhinetakse eelistusele, et generaatorid ei tohi tavasituatsioonis ise reaktiivvõimsust tarbida. Nõnda eemaldatakse üleüldise reaktiivvõimsuse langetamise korral valikutest need, mille reaktiivvõimsuse tootlikus läheneb arvulisele suurusele null. Muuhulgas võetakse arvesse veel mõlema sektsiooni latipinge lubatav ülemmäär. Lähtuvalt reaktiivvõimsuse ja võrgupinge omavahelisest sõltuvusest tähendab generaatorite suurem reaktiivvõimsuse tootmine ühtlasi

pinge kasvu. Juhtumil, kui vastav parameeter ületab maksimaalse piirväärtuse, milleks on sätestatud 6,9 kV, siis selle lati külge ühenduvate generaatorite reaktiivvõimsust enam ei suurendata. Samuti hakatakse vajadusel ehk pinge edasisel tõusul vähendada valitud generaatorite poolt väljastatavaid reaktiivvõimsuseid. Teoreetiliselt võib eelnevalt mainitud sätteväärtuse seadistada väiksemana ning sedamööda välistada lubatava pinge ülempiiri läheduses toimimine. Kokkuvõtlikult on generaatorite reaktiivvõimsuste osakaalu regulaatorite juhtimissüsteemi saabuvad teated ja sisendid nähtavad eelneval joonisel 3.10.

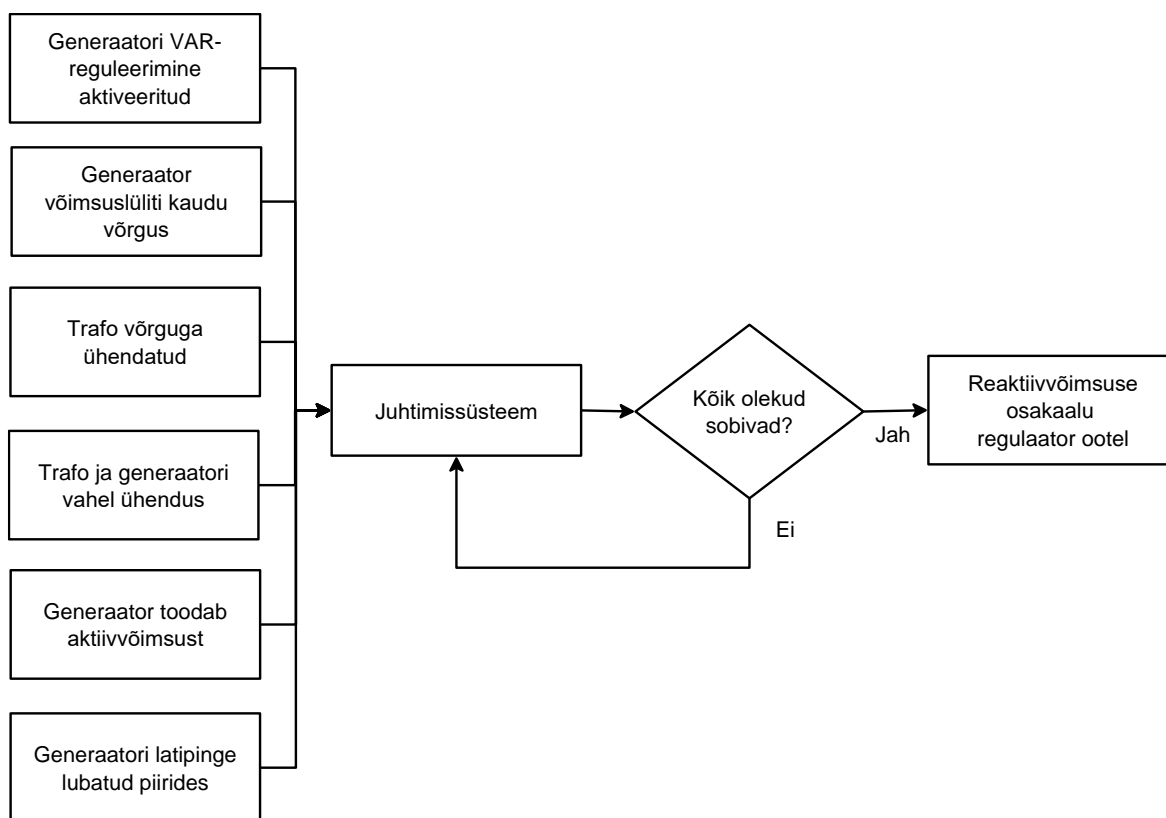


Joonis 3.10. Generaatorite reaktiivvõimsuste reguleerimise juhtimissüsteemi saabuv teave

Eelnevale juurde võib lisada võimalused, mille järgi põhivõrgu haldaja, Elering AS, edastab omapoolsed nõuded peatrafode C1T ja C2T primaarpoolel mõõdetavatele reaktiivvõimsuse suurustele. Nõnda saaks juhtimissüsteemis vastaval vajadusel ümber lülitada mainitud trafode juures reguleeritavate reaktiivvõimsuste arvulised hoitavad väärtused. Näitena tavasituatsioonis minimeeritakse ülekandevõrku saadetavat ja sellest võetavat reaktiivvõimsust ning nõnda on see eeldatavalt võimalikult väike, kuid sõltuvalt nõutust võidakse seda kas tõsta või langetada.

Sarnaselt on ka pingereguleerimise olukorras võimalik muuta generaatorite reaktiivvõimsuse regulaatoreid ja seadistada need hoidma teatud kindlat pingsuurst. Seda vastavalt Elering AS poolt määratud sätteväärtustele. Viimast pigem lähimatel lattidel, kuna põhivõrguga seotud ühenduste vahel paiknevad ülekandetraford, millel on astmeregulaatorid ja need mõjuvad ennekõike sekundaarpoolele.

Reaktiivvõimsuste jagamise üldise juhtimissüsteemi poolt iga seadme reaktiivvõimsuse osakaalu määrajasse vajalikke käskluste saatmine põhineb omakorda eeldustel, et elektrivõrgus ja trafode ning generaatorite juures on kõik olulised ja mõõdetavad parameetrid nõuetekohased. Ennekõike tähendab see teatud suuruste või väärtuste kindlate olekute olemasolu, mille võtab ülevaatlikult kokku järgnev joonis 3.11.



Joonis 3.11. Generaatori reaktiivvõimsuse osakaalu regulaatori aktiveerimiseks vajaminevad parameetrid

Generaatori reaktiivvõimsuse osakaalu regulaatori juhtimissüsteemi käivitamisel ja selle edasise toime jaoks on seega vajalik järgnevate olekute olemasolu:

- Generaator on kaasatud teatud trafo kaudu edastava reaktiivvõimsuse reguleerimisse;
- Generaatori võimsuslülitid kaudu on seade ühendatud elektrivõrguga;
- Vähemalt ühe ülekandetrafo võimsuslülitid on elektrivõrguga ühendatud;
- Vähemalt üks ülekandetrafo omab ühendust generaatori(te)ga;
- Generaator toodab aktiivvõimsust;
- Generaatori latipinge jääb alla lubatava ülempiiri;
- Generaatori toodetav reaktiivvõimsus jääb alla lubatava ülempiiri.

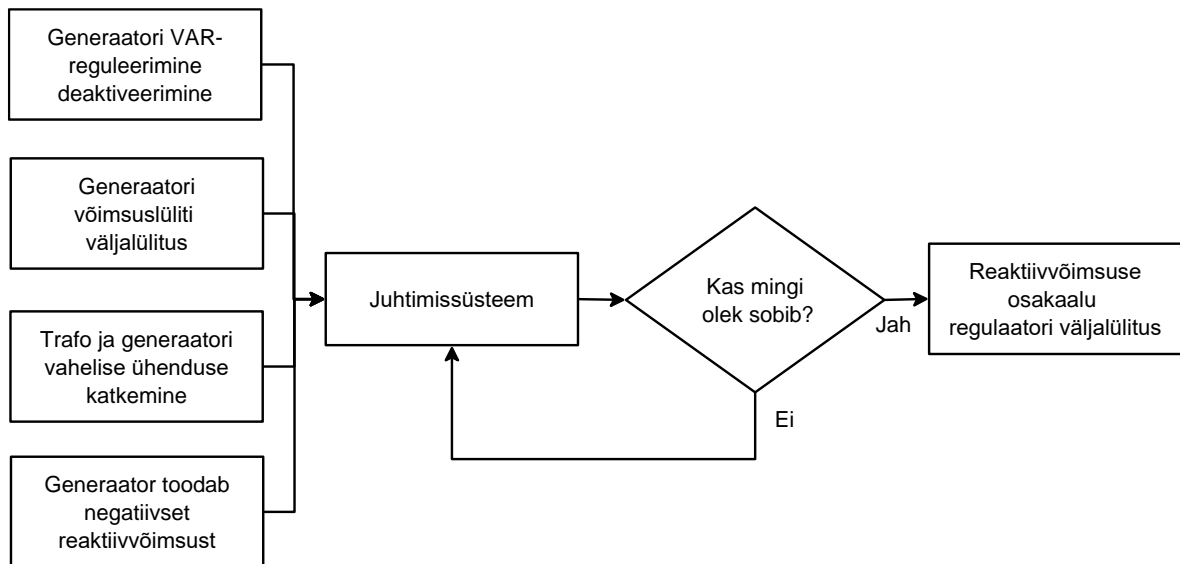
Juhul, kui üks nendest eelpool mainitud olekutest ei oma lubavat väärtust, vastav generaator reaktiivvõimsuse ülesreguleerimises ei osale. Reaktiivvõimsuse alla reguleerimise tarvis kõiki eelpool nimetatud olekuid pole vajadust arvesse võtta. Generaatori reaktiivvõimsuse osakaalu regulaatori juhtimissüsteemi seiskamise või selle automaatse väljalülituse jaoks on vajalik:

- Generaatori regulaatori tahtlik väljalülitamine;
- Generaatori või selle võimsuslülitid väljalülitamine;
- Trafo(de) ja generaatori(te) vahelise ühenduse katkemine;
- Generaator toodab negatiivset reaktiivvõimsust.*

*Olukorras, milles kõik reguleerimise alla kuuluvad generaatorid reaktiivvõimsust ei genereeri, kuid nende klemmi- või latipinge ületab lubatud piirmäära, võimaldatakse reaktiivvõimsuste reguleerimise juhtimissüsteemi kaudu generaatoritel toota negatiivset reaktiivvõimsust. Samuti võib sarnane olukord tekkida ka Elering AS poolt seatavate sätteväärtuste korral.

Sõltuvalt sellest, millistele generaatoritele eelpool mainitud piirangud kehtivad, eemaldatakse viimased ühtselt või siis sektsioonide raames reaktiivvõimsuse reguleerimisest. Juhul, kui pole tegemist tahtliku regulaatori väljalülitusega, mille käigus on juhtimissüsteemis vastav seade mittelubatud olekus, kaasatakse eelpool mainitud piirangute kadumisel reaktiivvõimsuse reguleerimisest eemal olevad seadmed uuesti valikute hulka. Mõistetavalt tähendab see kõigi selle jaoks vajaminevate lubatavate suuruste olemasolu.

Samuti pole ettemääratud võimalused generaatoritel langeda negatiivse reaktiivvõimsuse piiridesse, kuna eeldatavalt vajatakse elektrivõrgus ennekõike tarbitavat reaktiivvõimsust. Nõnda säärase olukorra korral edastatakse teatud seadme reaktiivvõimsuse osakaalu regulaatorisse teave, mis muudab selle väärtuse suuruseks null. Seetõttu ei pääse ka PI-lülitist väljuv informatsioon edasi vastava generaatori ergutusahelasse. Kokkuvõtlikult ilmestab edasine joonis 3.12 kirjeldatud.

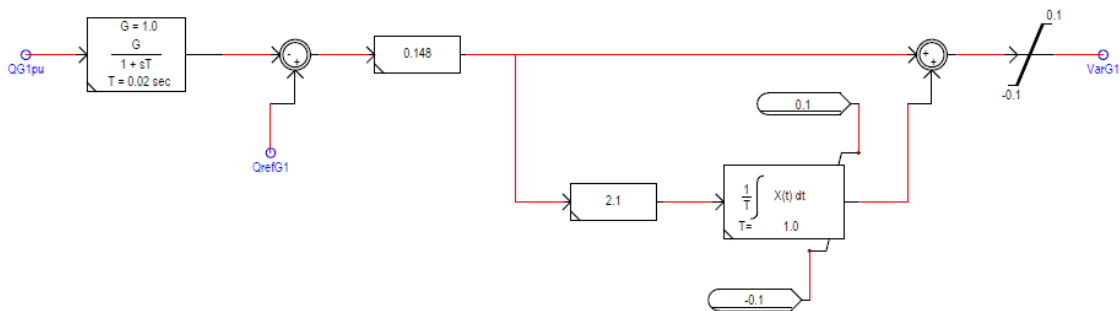


Joonis 3.12. Generaatori reaktiivvõimsuse osakaalu regulaatori deaktiveerimiseks vajaminevad parameetrid

Muuhulgas võib lisada generaatorite reaktiivvõimsuste osakaalu regulaatorite juhtimissüsteemile võimekus kontrollida loogikalülidesse sisenevate mõõteandmete õigsust. Seda tehakse näitena liinide alguses ja lõpus liikuvate reaktiivvõimsuste võrdlemisega või generaatorite väljundites ja teatud liinidel liikuva reaktiivvõimsuse summaarse erinevuse leidmisega. Säärane lahendus tagab üldise reguleerimise korrektse toimimise.

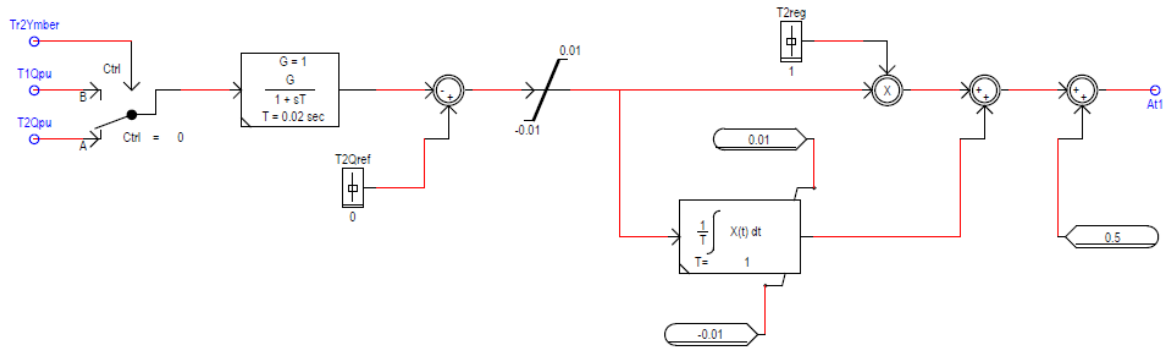
3.4 RSCAD programmpõhine ülesehitus

Edasiselt tuuakse välja olulisemad komponendid generaatorite reaktiivvõimsuste regulaatori ülesehitusest, mis põhinevad eelnevates peatükkides kirjeldatud. Erinevad ümberlülitused ja sarnased mitmeid sisendeid või väljundeid kokkuvõtavad lülid jäetakse kõrvale, kuna need täidavad lihtsamaid funktsioone. Muuhulgas peatutakse käesoleva magistritöö peatükis 4 regulaatori ülesehituslikel skeemidel veelkord. Samuti tasub mainida, et tegemist on ikkagi ühe võimaliku ülesehitusega, mida saab vajadusel modifitseerida. Joonisel 3.13 on esitatud VAR-regulaator, mille saabub teave sisenditega QG1pu ja QrefG1 ning väljub edasi ergutussüsteemi VarG1 kaudu.



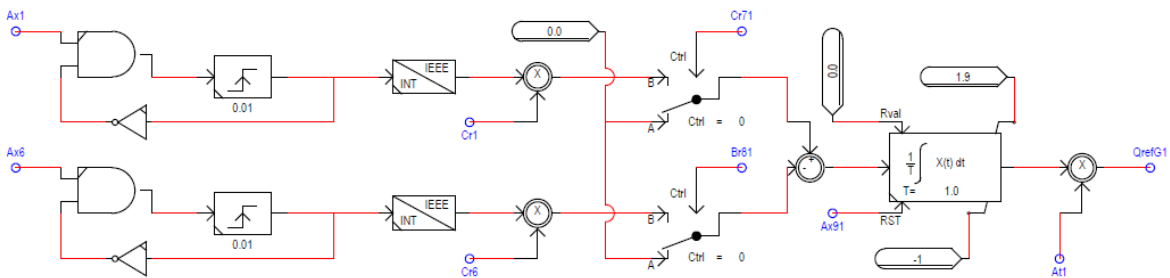
Joonis 3.13. Generaatori G1 VAR-regulaatori ülesehitus

Edasisel joonisel 3.14 on PI-regulaator, millega tehakse täpsemad reguleerimised, et hoida liitumispunktis mõõdetav reaktiivvõimsus kindlal väärtusel. Vasakul on näha mõõtesisendid T1Qpu ja T2Qpu ning nende vaheline ümberlülitus Tr2Ymber rakendusel. Väljundväärtus At1 edastatakse joonisel 3.15 asetsevase osakaalude regulaatorisse ehk reaktiivvõimsuse fiksaatorisse.



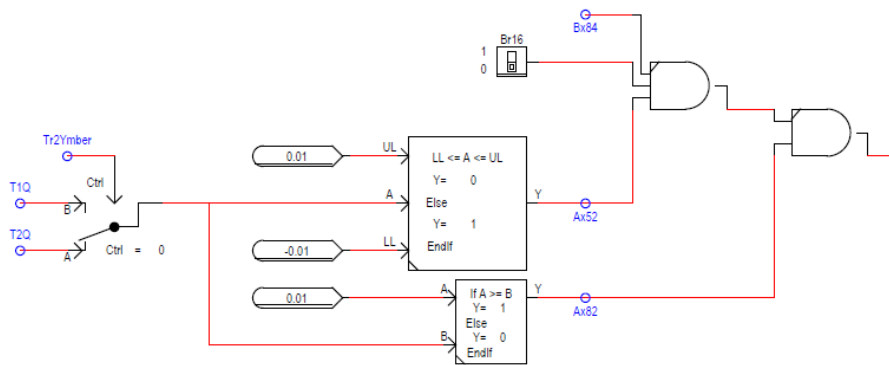
Joonis 3.14. Peaesmärgi saavutamist jälgiv PI-regulaator

Joonisel 3.15 toimub ühenduste Ax1 ja Ax6 kaudu vastavalt generaatori reaktiivvõimsuse tõstmine või langetamine suurendades või vähendades integraatori väljundit. Cr1 ja Cr6 on reguleerimiskiirust fikseerivad parameetrid, mida saab vajadusel teatud ümberlülitustega muuta. Sisendi Ax91 kaudu saab lähtestada integraatorit, näitena kiiret välja lülitumist soovides. Väljundiga QrefG1 muudetakse VAR-regulaatoris sättesuurust ja sunnitakse generaatorit tootma või tarbima teatud koguse reaktiivvõimsust.

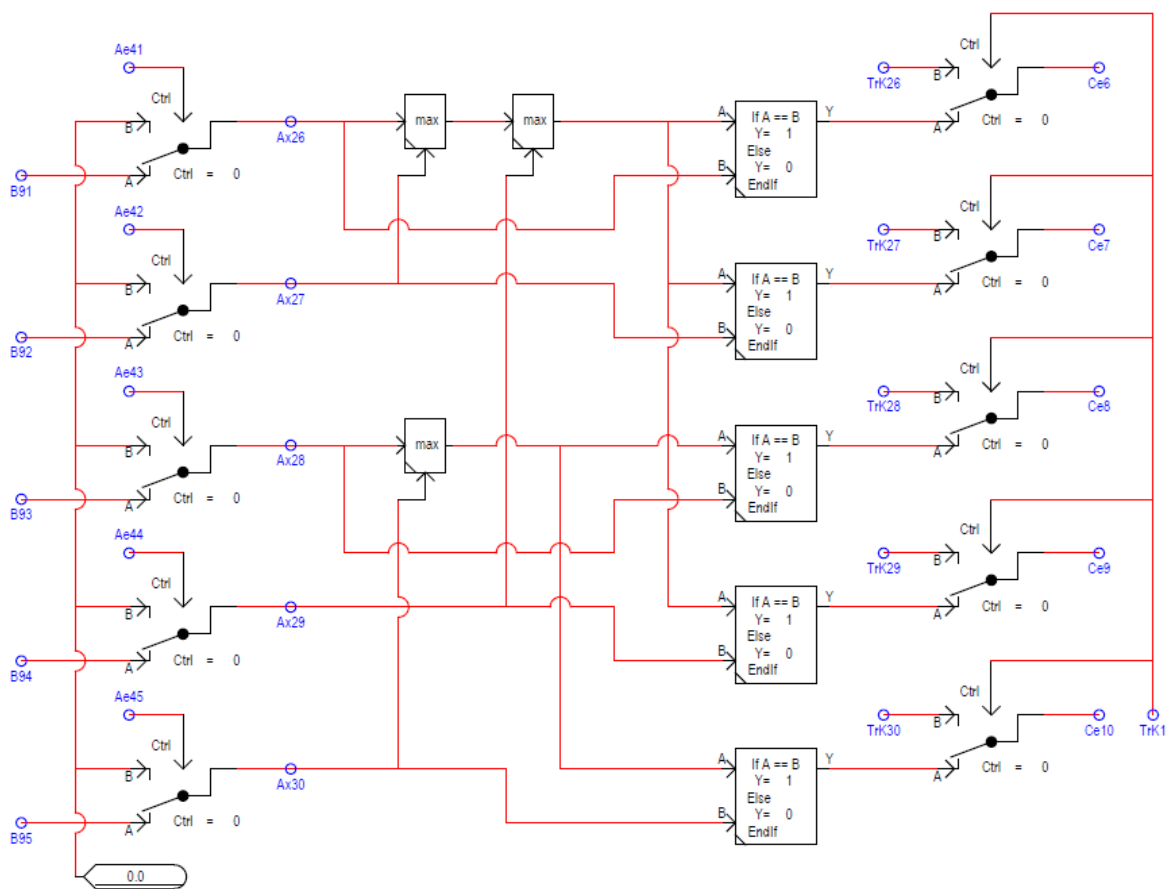


Joonis 3.15. Osakaalude regulaator ehk reaktiivvõimsuse fiksaator generaator G1 näitel

Peaesmärgi täitmisel ehk liitumispunktis reaktiivvõimsusvahetuse minimeerimisel tuginetakse joonisel 3.16 olevale komponendile. Selle kaudu tehakse kindlaks, kas on vaja generaatoritega reaktiivvõimsust juurde genereerida või vähendada. Otseselt ühendub vastav lülitus reaktiivvõimsuste osakaalude regulaatoritega ja selle mõju avaldub näitena joonisel 3.15 asuvate Ax1 ja Ax6 kaudu. Tegemist on samas ühe osaga suuremast sisendite rühmast, millega määratakse ära iga generaatori reguleerimisevõimekus ja vastava saada olemine.



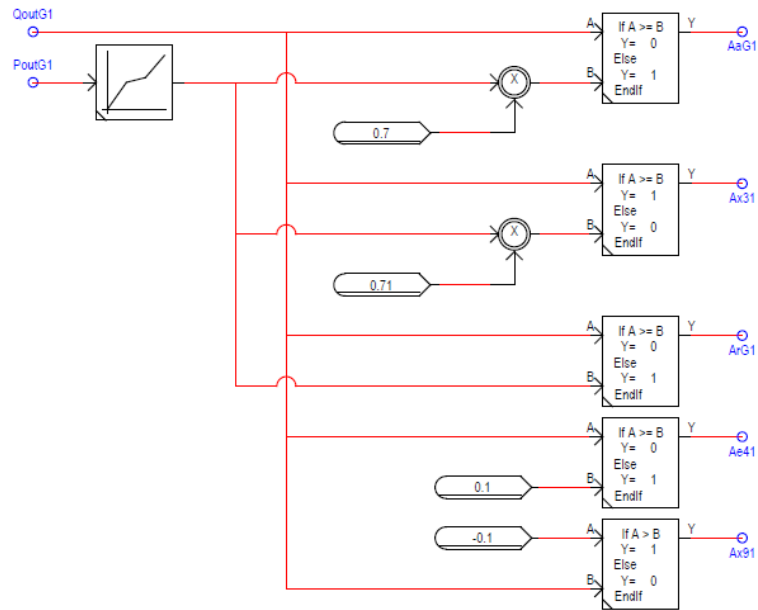
Joonis 3.16. Osakaalude regulaatori ehk reaktiivvõimsuse fiksaatori peamine sisendlüli



Joonis 3.17. Maksimaalsete väärtuste selektor

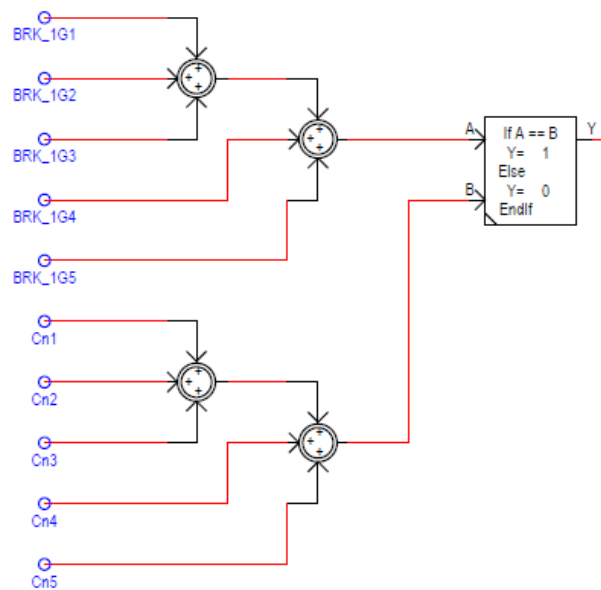
Eelneval joonisel 3.17 olevate lülidega saab eristada generaatoreid erinevate parameetrite või mõõtesuuruste järgi, mis võetakse ühendustega B91...95. Siinkohal on tegemist kahte eraldi sektsiooni arvestava lahendusega. Situatsioonis, milles saabub teave kahe sektsiooni või trafode kokku ühendamise kohta TrK1 vahendusel, lähtutakse kõigi generaatorite võimalikus valimises ning

rakenduvad TrK26...30. Viimased saabuvad samalaadsest lülid kogumist, ainult seekord võrreldakse kõiki viit generaatorit korraga. Olukorras, milles teatud generaator arvatakse reaktiivvõimsuse alla reguleerimisest välja, rakendatakse sisendeid Ae41...45. Väljundid Ce6...10 saadetakse läbi ümberlülituse osakaalude regulaatorisse joonisel 3.15 näitena Ax6 kaudu. Sarnane põhimõte on kasutusel ka minimaalsete arvuliste suuruste võrdlemisel, kuid siis liigub teave vastavalt Ax1 vahendusel.



Joonis 3.18. Generaatori reaktiivvõimsuse piirajad

Eelneval joonisel 3.18 on esitatud erinevate generaatori reaktiivvõimsuse suurustega seonduvate piirajate ülesehitus. Näitena QoutG1 ja PoutG1, millega määratakse PQ-kõverat iseloomustava lüli kaudu maksimaalne lubatav reaktiivvõimsuse suurus, tähistavad generaator G1 poolt väljastatavat aktiiv- ja reaktiivvõimsust. Väljundiga AaG1 tehakse kindlaks, kas generaator on saavutanud mingi etteseadistatud reaktiivvõimsuse piirmäära ning selle tõepärasuse korral välistatakse see reaktiivvõimsuse tõstmisest. Ax31 kaudu hoitakse generaatori reaktiivvõimsust soovitud piiri juures erinevate võnkumiste ja muude võrguprotsesside korral. ArG1 rakendumine tähendab generaatorite poolt reaktiivvõimsuse ülemmäära saavutamist ning Ae41 ja Ax91 näitavad, kas generaator toodab reaktiivvõimsust või hoopis tarbib seda ning vajatakse peatükis 3.3 üles täheldatud põhimõtetele tuginedes. Muuhulgas on sarnaseid piirajaid vaja ka generaatori minimaalse reaktiivvõimsuse ning ka latipingete määramiseks. Kokkuvõtlikult edastatakse vastavaid väljundeid sisaldav teave kaudselt või otseselt osakaalude regulaatorisse ning need mõjutavad näitena ühendusi Ax1 ja Ax6.



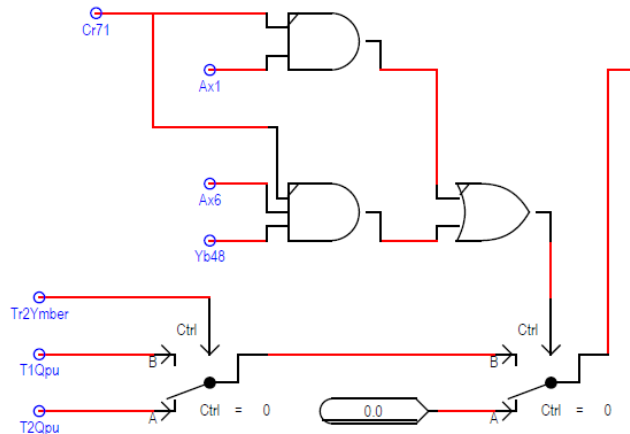
Joonis 3.19. Valikus olevate generaatorite ja nende teatud piirväärtuste saavutamise määramine

Olukorras, milles on reguleerimise käigus vaja välja selgitada, kas näitena kõik reguleerimise alla kuuluvad generaatorid on jõudnud kindla suuruseni toodetavast reaktiivvõimsusest, saab rakendada joonisel 3.19 toodud lülitust. Selles iseloomustavad sisendid algusega BRK generaatorite võimsuslülitid ja algusega Cn käesolevas olukorras reaktiivvõimsuse teatud väärtuse saavutamist. Juhul kui võrreldavad arvud on samad, näitena kõik generaatorid toodavad 70% PQ-kõvera põhiseist reaktiivvõimsusest, lülitatakse ühest reguleerimismeetodist teisele. Muuhulgas võib säärane situatsioon tähendada joonisel 3.17 olevast komponendist möödaminekut ja osakaalude regulaatoris reguleerimiskiiruste parameetrite ümbermuutmist. Nõnda sisaldab üleüldine juhtimissüsteem mitmesuguseid lülitusi, mis ennekõike valivad ühe sisendi asemel teise.

Juhul, kui otsustatakse paigaldada iga generaatori VAR-regulaatori ette eraldi PI-regulaator, saab viimase muutumist piirata joonisel 3.20 oleva lahendusega. Selles tähistavad sisendid Ax1 ja Ax6 teatud generaatori reaktiivvõimsuse üles või alla reguleerimise käskluseid, mida täiendavad omakorda olekud Cr71, mis iseloomustab vastava generaatori reaktiivvõimsuse reguleerimise lubatavust, ja Yb48, mis seondub maksimaalsete väärtuste selektoriga. Mainitu on nähtav eelpool paikneval joonisel 3.17. Põhimõtteliselt rakenduvad ka siinkohal võimalused, mille korral saab nii minimaalsete kui maksimaalsete väärtuste selektorist vajadusel ümber minna, kui kasutatakse teisi generaatorite vahel reaktiivvõimsuse jagamise meetodeid peale mõõtesuuruste võrdlemise. Joonisel 3.20 asetseva parempoolse ahelaga on vastav lülitus ühendatud PI-regulaatoriga.

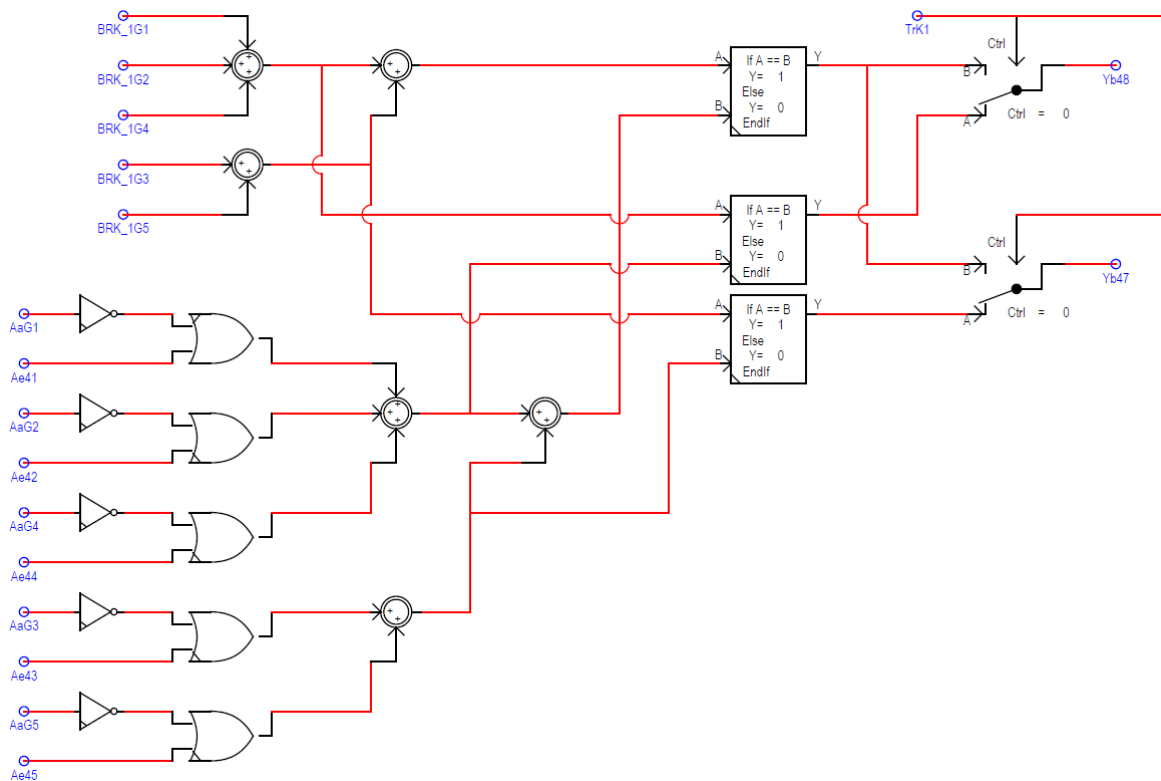
Käesoleva magistr töö raames säärast lahendust ei kasutatud ning vastatavat otsust selgitati peatüki 2 teises pooles ning 3 alguses. Ennekõike on see ülesehitus esile tõstetud näitena, et luua

teatud visuaalne arusaam. Samuti on vajadusel võimalik mainitud alusena võttes konstrueerida täielik reaktiivvõimsuste regulaator.



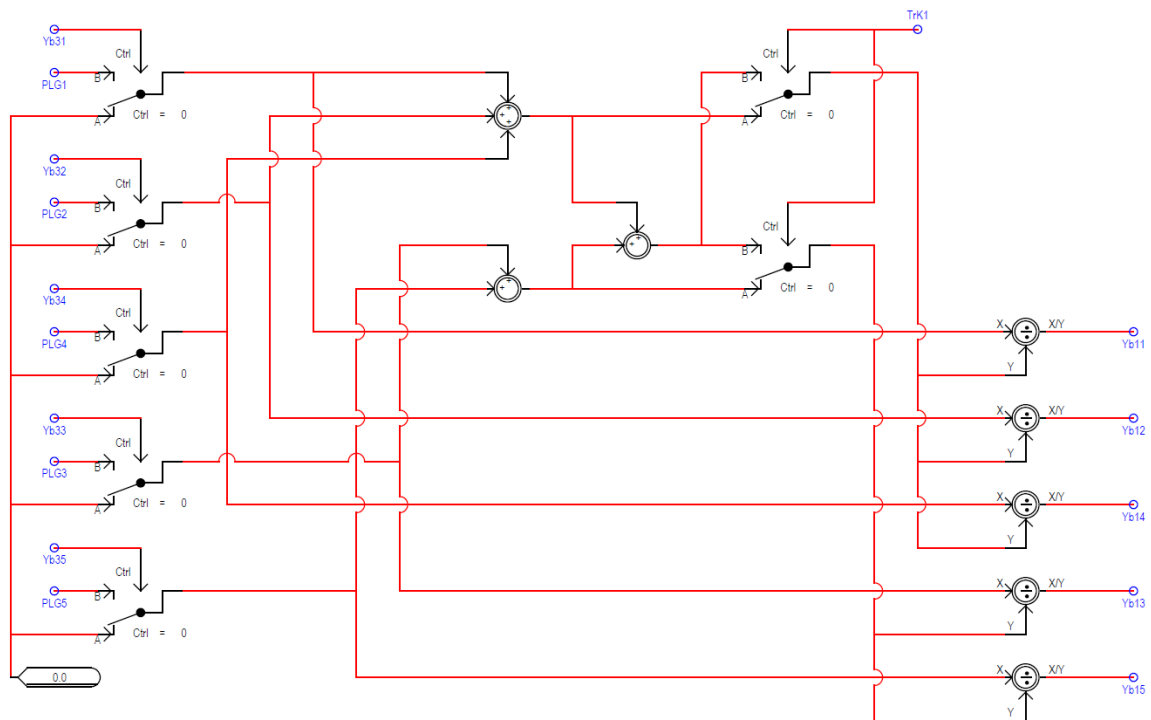
Joonis 3.20. Generaatori reaktiivvõimsuse fiksaator (juhul, kui iga generaatori kohta on peaesmärgi täitmist järgiv PI-regulaator)

Edasisel joonisel 3.21 on näha lülitus, millega antakse väljunditega Yb47 ja Yb48 käsklus teatud generaatori reaktiivvõimsuse langetamiseks joonisel 3.20 olevasse ahelasse. Sisendid algusega BRK ilmestavad generaatorite võimsuslülititeid ning algusega Aa ja Ae kindla generaatori genereeritava reaktiivvõimsuse taset.



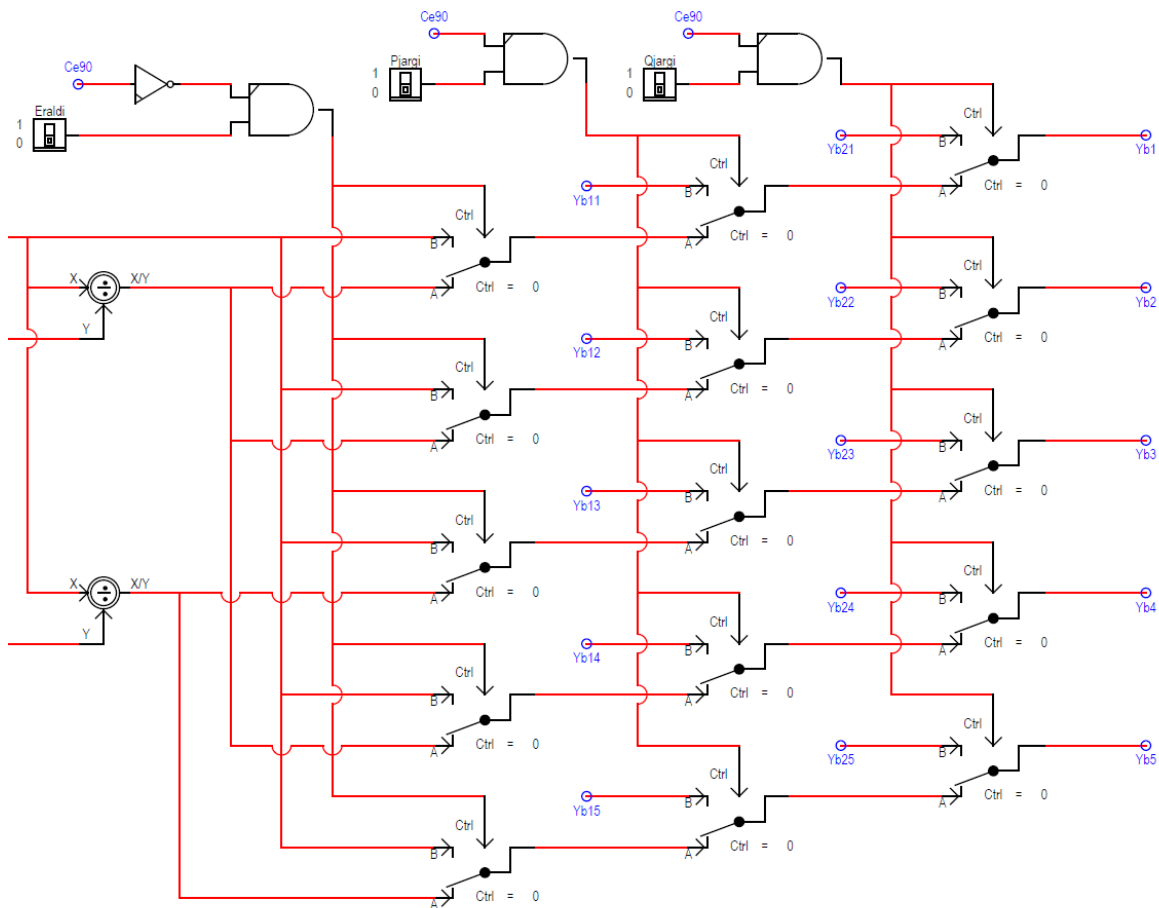
Joonis 3.21. Generaatori reaktiivvõimsuse langetamise lubamise määramine (juhul, kui iga generaatori kohta on peaesmärgi täitmist järgiv PI-regulaator)

Järgnev joonis 3.22 iseloomustab näitena ühte võimalust, kuidas saavutada vajaminevad väärtused, mida läheb tarvis mitme generaatori vahel reaktiivvõimsuse proportsionaalseks jagamiseks. Sisendid PLG1...5 tähistavad generaatorite aktiivvõimsuse tootlikkuse kogust, kui võimsustegur on generaatoritel sama, ning algusega Yb3 lülitatakse teatud generaatorid valiku hulka. Väljunditega Yb11...15 määratakse generaatorite VAR-regulaatoritesse saabuva suuruse muutumise kiirus kas läbi osakaalude regulaatori või mõnel teisel moel. Trk1 nagu varemgi mainitud toimib mitme trafo paralleeltöö, aga ka generaatorite jaotla seksioonide kokku ühendamise korral.



Joonis 3.22. Generaatorite reaktiivvõimsuste proportsionaalse jaoturi üks võimalik konstruktsioon

Siinkohal võib veel esile tuua lülide kogumi, mille kaudu saab mitme generaatori vahel reaktiivvõimsuse jagamise erinevaid meetodeid rakendada. Seda ilmestab joonis 3.23. Väljunditega Yb1...5 seadistatakse iga generaatori reaktiivvõimsuse suurendamise või vähendamise kiirus ning sisendid Yb11...15 ja Yb21...25 tähistavad vastavalt reaktiivvõimsuse proportsionaalsete jagamise meetodeid realiseerivate lülituste tulemeid. Joonise 3.23 vasakul pool eelnevad omakorda võrdelise meetodi tulemite ahelad, mida saab vajadusel ümber suunata mõõteväärtuste järgi reguleerimisele. Muuhulgas on oluline tagada ka teiste ühenduslülituste ja parameetrite vastavus niimoodi meetodite vahel valides. Tasub siiski mainida, et tegemist on ikkagi ennekõike reaktiivvõimsuste regulaatorite juhtimissüsteemi katsetamise ja selle efektiivsuses veendumise vahendiga ning seetõttu pole seda otseselt vaja rakendada reaalses kontrollis, kuna üldjoontes valitakse välja sobivaim meetod, mida vastava objekti raames kasutatakse.



Joonis 3.23. Generaatorite reaktiivvõimsuste jaotamise meetodite vahelised ümberlülitused

3.5 Juhtimissüsteemi rakendamise tulemused

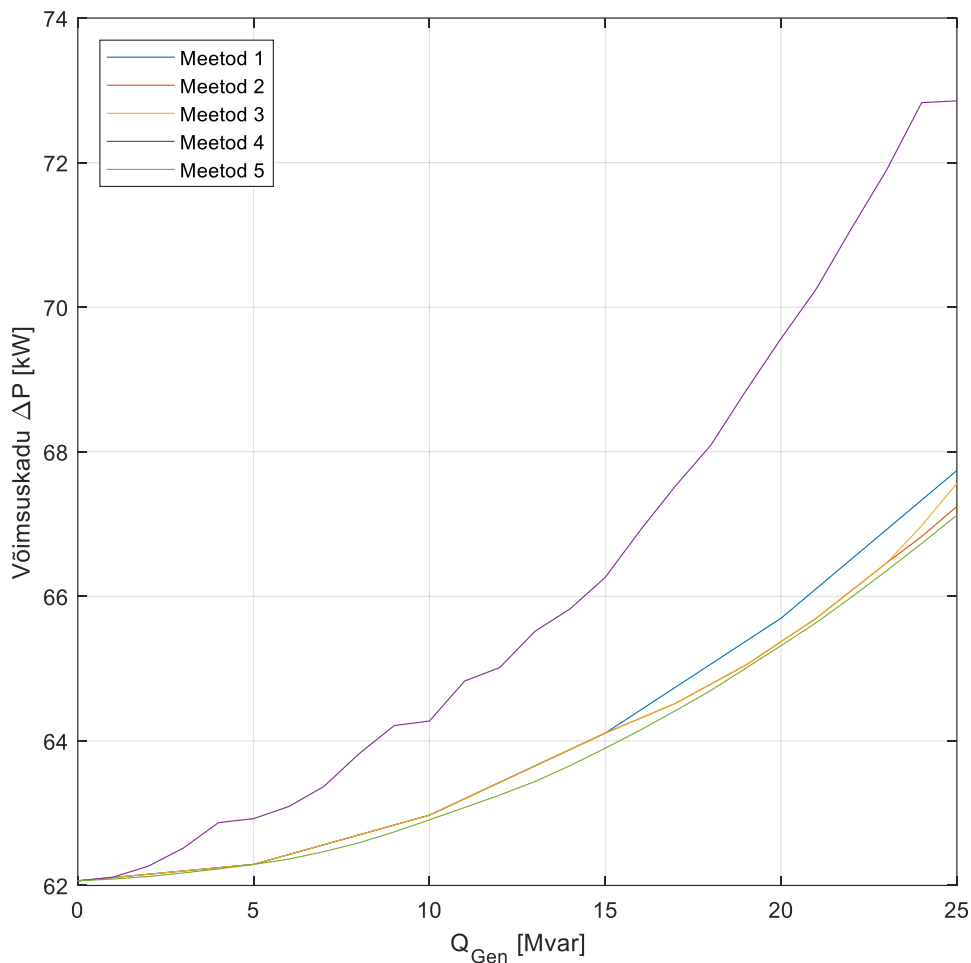
Käesoleva magistritöö peatükis 2 kirjeldati erinevaid mitme generaatori vahel reaktiivvõimsuse jaotamise meetodeid koos võimalikke regulaatorite ülesehitustega. Selle lõpupooles toodi esile olulisemad põhjused mõningate meetodite eelistamises ning selgitati muuhulgas ka edaspidiselt kasutatava üldise reaktiivvõimsuste regulaatori konstruktsiooni. Eelneva peatüki 3 raames anti ülevaade RSCADis modelleeritud regulaatorite juhtimissüsteemi rakendamisest peaesmärgi saavutamisel ning kokkuvõtlikult viidi reaalaja simulaatoriga läbi hulga katseseeriaid.

Järgneval joonisel 3.24 on toodud viie peamise generaatorite vahel reaktiivvõimsuse jagamise meetodi võrdlus. Täpsemalt vaadeldakse generaatorite klemmide ja jaotlaseksioonide vahelistes kaabelliinides tekkivaid aktiivvõimsuskadude suurusi ja nende erinevust rakendatavate meetodite raames. Elektriijaama sisese reaktiivkoormuse kasvuna võetakse lõppsuurus 25 MVA. Tegemist on alusena kasutatava objekti mõistes juba väga suure reaktiivvõimsuse nõudlusega. Üldjuhul jäävad tarbitavad kogused umbes poole sellest suuruselt. Generaatorite aktiivvõimsusteks seati vastavalt

26, 10, 10, 10 ja 30 MW (G1, G2, G3, G4, G5) ehk ligikaudu 90% nende võimalikust ülempiirist.

Edasiselt tuuakse kasutatavate meetodite selgitused:

- Meetod 1: võrdeline;
- Meetod 2: proportsionaalselt aktiivvõimsuse järgi;
- Meetod 3: proportsionaalselt reaktiivvõimsuse limiidi järgi;
- Meetod 4: Ühendusliini aktiivvõimsuskao mõõteväärtuse järgi;
- Meetod 5: Ühendusliini aktiivvõimsuskao suhtelise juurdekasvu järgi.



Joonis 3.24. Generaatorite eristamisel vaadeldud meetodite rakendamisel tekkivad aktiivvõimsuskadod

Tabelis 3.4 tõstetakse esile iga meetodi korral generaatorite reaktiivvõimsus. Viimase lubatav suurim väärtus vastavalt meetoditele on 21, 8, 8, 8 ja 17 (G1, G2, G3, G4, G5) Mvar. Muuhulgas eeldatakse, et elektrijaama sektsioonid on kokku ühendatud. Arusaadavalt muutuvad saadud tulemused sõltuvalt aktiveeritud generaatorite ja tarbijaid varustavate sektsioonide hulgast.

Tabel 3.4. Generaatorite poolt toodetud reaktiivvõimsus erinevate meetodite korral

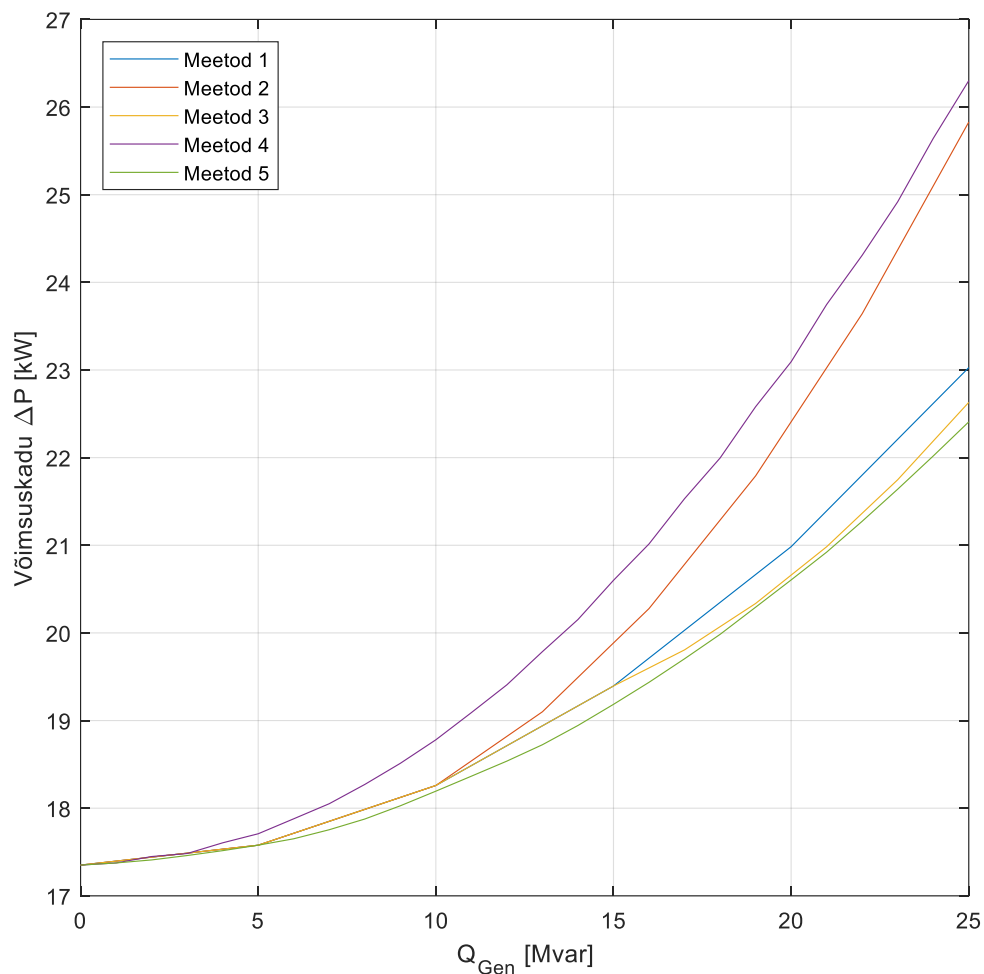
Generaatori reaktiivvõimsus	Meetod 1	Meetod 2	Meetod 3	Meetod 4	Meetod 5
$Q_{G1}, Mvar$	5	7,6	8,5	0	6
$Q_{G2}, Mvar$	5	2,9	3,2	8	4
$Q_{G3}, Mvar$	5	2,9	3,2	8	4
$Q_{G4}, Mvar$	5	2,9	3,2	8	3
$Q_{G5}, Mvar$	5	8,7	6,9	1	8

Eelnevast joonisest 3.24 ja tabelist 3.4 nähtub, et kõige ebaefektiivsem on käesoleva situatsiooni korral eristada generaatoreid aktiivvõimsuskao mõõteväärtuse järgi. Olenemata sellest, et igal ajahetkel valitakse küll madalama arvsuurusega sisend, ei suuda vastav meetod kajastada tegelikku aktiivvõimsuskadude kasvamise kiirust. Lisaks, meetodi 4 korral on kolm generaatorit saavutnud reaktiivvõimsuse ülempiiri ning suurema võimekusega generaatorid ei tooda põhimõtteliselt midagi. Ülejäänud neli meetodit annavad suhteliselt samalaadseid tulemusi. Jättes kõrvale meetodi 1, võimaldavad ülejäänud situatsioonid jagada reaktiivvõimsuse generaatorite vahel proportsionaalselt või sellesarnaselt. Kõige optimaalsemad tulemused annab meetod 5 rakendamine, kuna see põhineb ikkagi aktiivvõimsuskadude suhteliste juurdekasvude erinevustel. Samas, tegemist pole siinkohal väga märkimisväärsete kõrvakekalletega meetoditest 1, 2 ja 3.

Muuhulgas on vajalik veel lisada, et meetodi 2 ja 3 korral on normaalolukorras välistatud generaatorite jõudmine reaktiivvõimsuse lubatavate piirideni. Meetodite 1, 4 ja 5 kasutamisel säärase situatsiooni vältimine nõuab juba täiendavate piirajate kasutamist. Teisest küljest on küllaltki tõenäoline, et reaktiivvõimsuste regulaatoris rakendatakse nimetatud elemente. Samuti ei ole välistatud, et üldine juhtimissüsteem võimaldab kombineerida mitmeid meetodeid, näitena alguses toimub reguleerimine meetod 5 põhjal ja teatud generaatorite reaktiivvõimsuste tasemete saavutamisel edasi meetod 3 järgi. Mõistetavalt pole siinkohal enam eeldatav võimsuskadude optimaalseim vähendamine. Kokkuvõtlikult tasub tõdeda, et eelnevas punktis 3.3 kirjeldatud juhtimissüsteemi ülesehitus võimaldab rakendada kõiki mainitud viite meetodit, lihtsalt on vajalik ühendusliinide mõõteandmete sisendid ümber muuta või asendada kindlate fikseeritud parameetritega. Täpsemalt peatutakse veel korra joonisel 3.24 oleval graafikul nähtavate erisuste mõjul järgnevas peatükis 3.6.

Lisaks tuuakse siinkohal illustreerivalt joonisel 3.25 esile olukord, milles suuremate ühendusliinide takistustega generaatorid G1 ja G5 toodavad väga väiksel määral aktiivvõimsust ehk ainult 4 MW, kuid ülejäänud kolm peaaegu maksimumis piirides ehk 11 MW. Muutunud on ka G1 ja G5

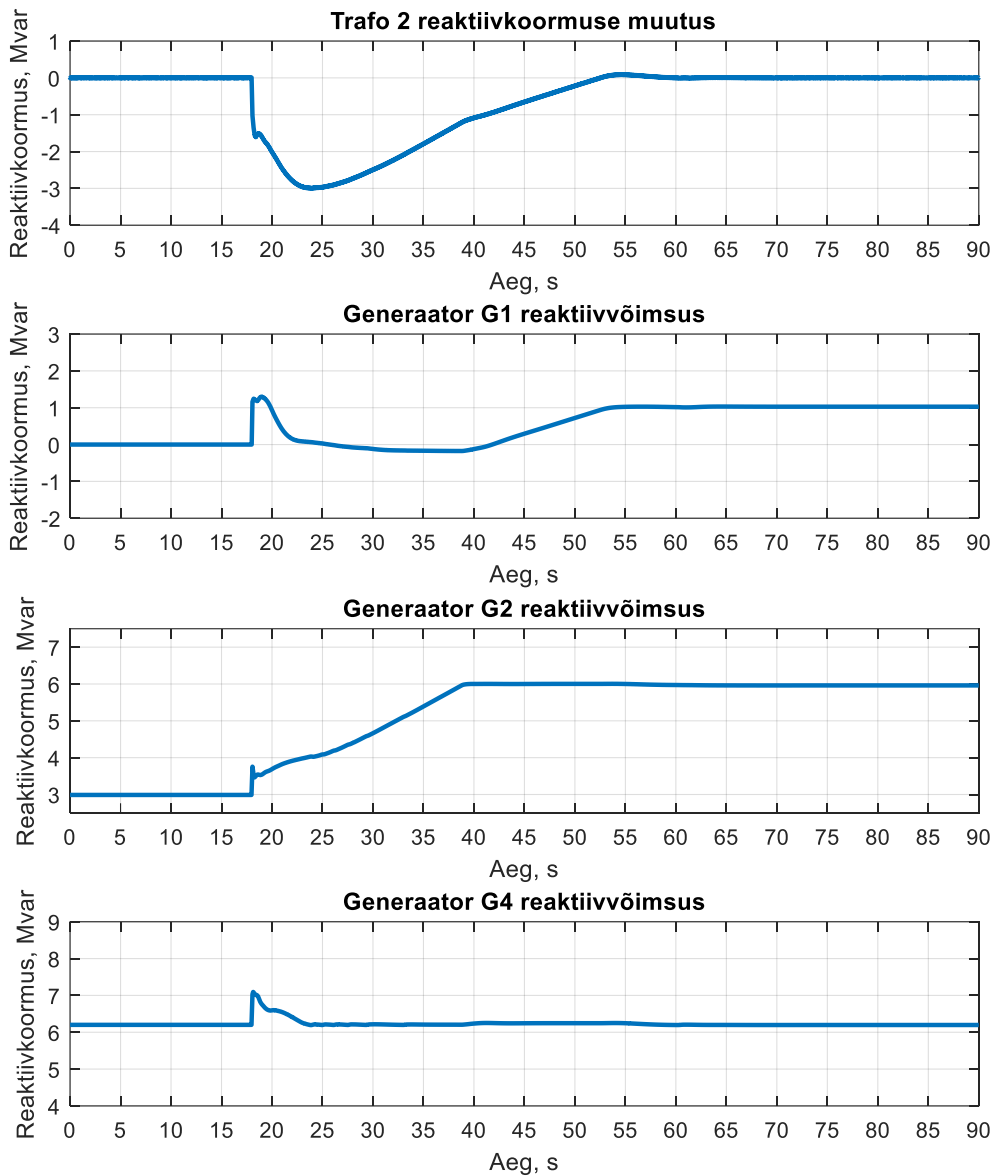
reaktiivvõimsuste ülempiirid, milledeks on vastavalt arvuline väärtus 27 Mvar. Sarnaselt eelpool kirjeldatud olukorrale jäävad siiski lõppresultaadid üldjoontes samalaadseteks. Meetod 4 osutub jällegi kõige ebaefektiivsemaks ning meetod 5 annab parima tulemi. Eelistatavad on veel meetod 1 ja 3, millest viimane näib olevat lihtsama reaktiivvõimsuste regulaatori ülesehituse korral arvatavasti sobivaim lahendus. Meetod 2 sellel korral ei suuda piisavalt täpselt edasi kanda generaatorite suurust ja reguleerimise reservi. Siinkohal tasub ikkagi mainida, et tegemist on pigem näitena toodud situatsiooniga ning tavaolukorras eeldatavalt toodavad kõik valikus olevad generaatorid võimalikult palju aktiivvõimsust.



Joonis 3.25. Generaatorite eristamisel vaadeldud meetodite rakendamisel tekkivad aktiivvõimsuskaod

Edasiselt on joonistel 3.26...3.33 esitatud peaeesmärgi ehk liitumispunktis reaktiivvahetuse minimeerimise saavutamise eelpool kirjeldatud RSCADis koostatud ülesehitust kasutades. Samamoodi eelnevaga rakendati mitut erinevat meetodit ilmestamiseks konstrueeritud juhtimissüsteemi ootusepärast toimimist. Siinkohal tuleb toonitada, et tegemist on ennekõike mõningate näiteolukordadega ning nende kaudu esitatakse üldise konstrueeritud juhtimissüsteemi reageering reaktiivkoormuse muutustele.

Joonisel 3.26 on vaadeldav regulaatori toimimine peaesmärgi täitmisel elektriama seesmise reaktiivkoormuse tõusule 4 Mvar.

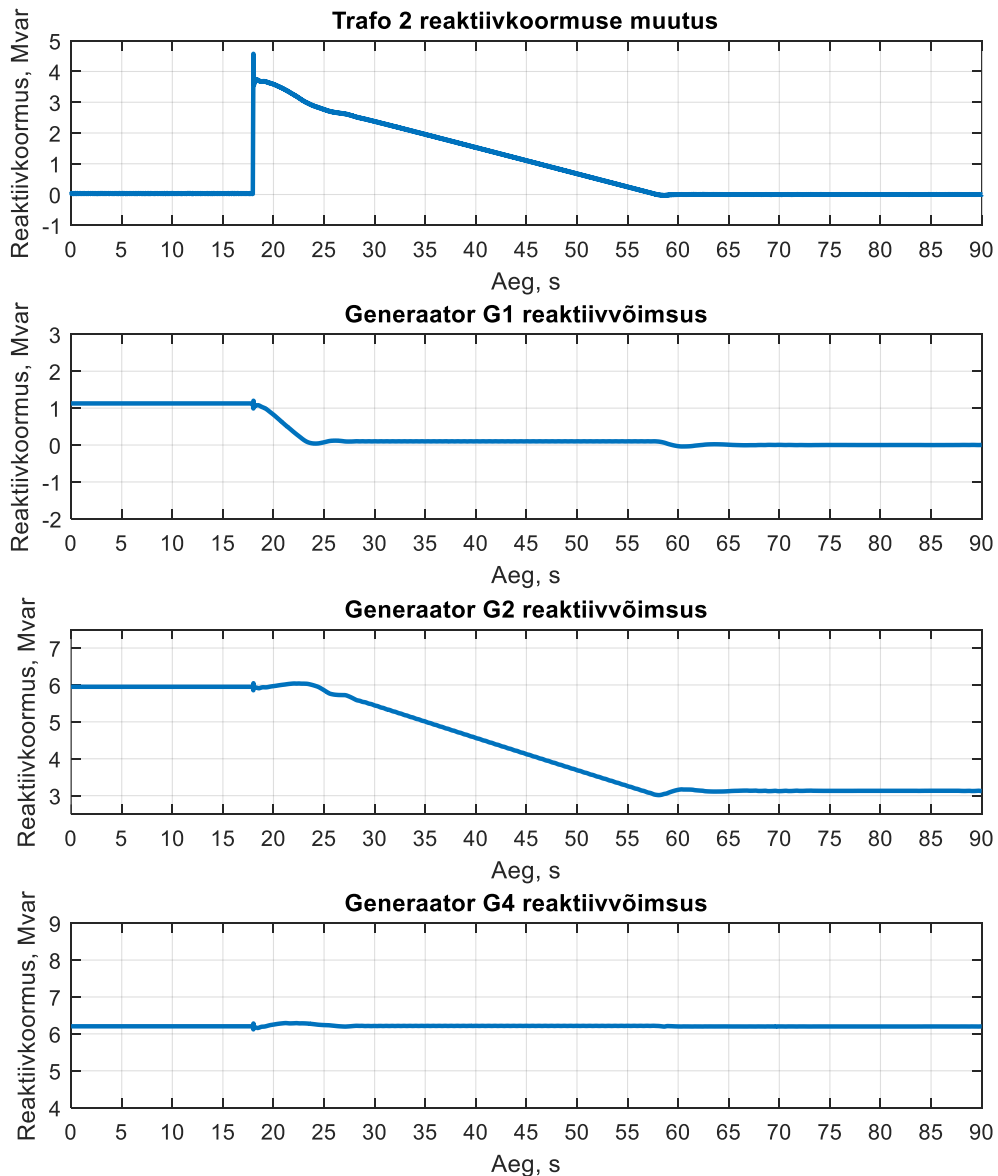


Joonis 3.26. Liitumispunktis mõõdetava reaktiivvõimsuse minimeerimine koormuse kasvul

Käesolevalt kasutatakse meetodit 5, mis võtab arvesse aktiivvõimsuskadude suhteliste juurdekasvude kiirused. Sellest tulenevalt tõstetakse esmalt generaator G2 väljastatavat reaktiivvõimsust peaaegu suuruseni 6 Mvar ning seda tehakse ajavahemikus 25 kuni 40 sekundit. Seejärel jätkab reaktiivvõimsuse vahetuse minimeerimist ja tarbijate nõudluse täitmist G1, mis toodab puudujääva suuruse ajavahemikus 40 kuni 55 s. Kolmanda valikus oleva generaatori G4 reaktiivvõimsust ei muudetud ning see jäi samasugusele tasemele, mis oli enne reaktiivkoormuse muutumist. Arusaadavalt reageerivad ikkagi koormuse vahetumisele esmaselt generaatorite ergutussüsteemid ja toimuvad teineteise tasakaalustamised ning latipinge hoidmised. Nõnda on

nähtav teatud ebastabiilne keskkond ajavahemikus 18 kuni 25 s. Samuti ilmneb G1 kaldumine negatiivsele poolele kuni generaator G2 lõpetab reaktiivvõimsuse suurendamise. Seda saab selgitada ühe generaatori vastureaktsiooniga sama alajaama ühenduslati küljes oleva teise generaatori tegevusele.

Järgneval joonisel 3.27 reageerib üldine generaatorite reaktiivvõimsuste juhtimissüsteem reaktiivkoormuse langusele suurusega 4 Mvar.

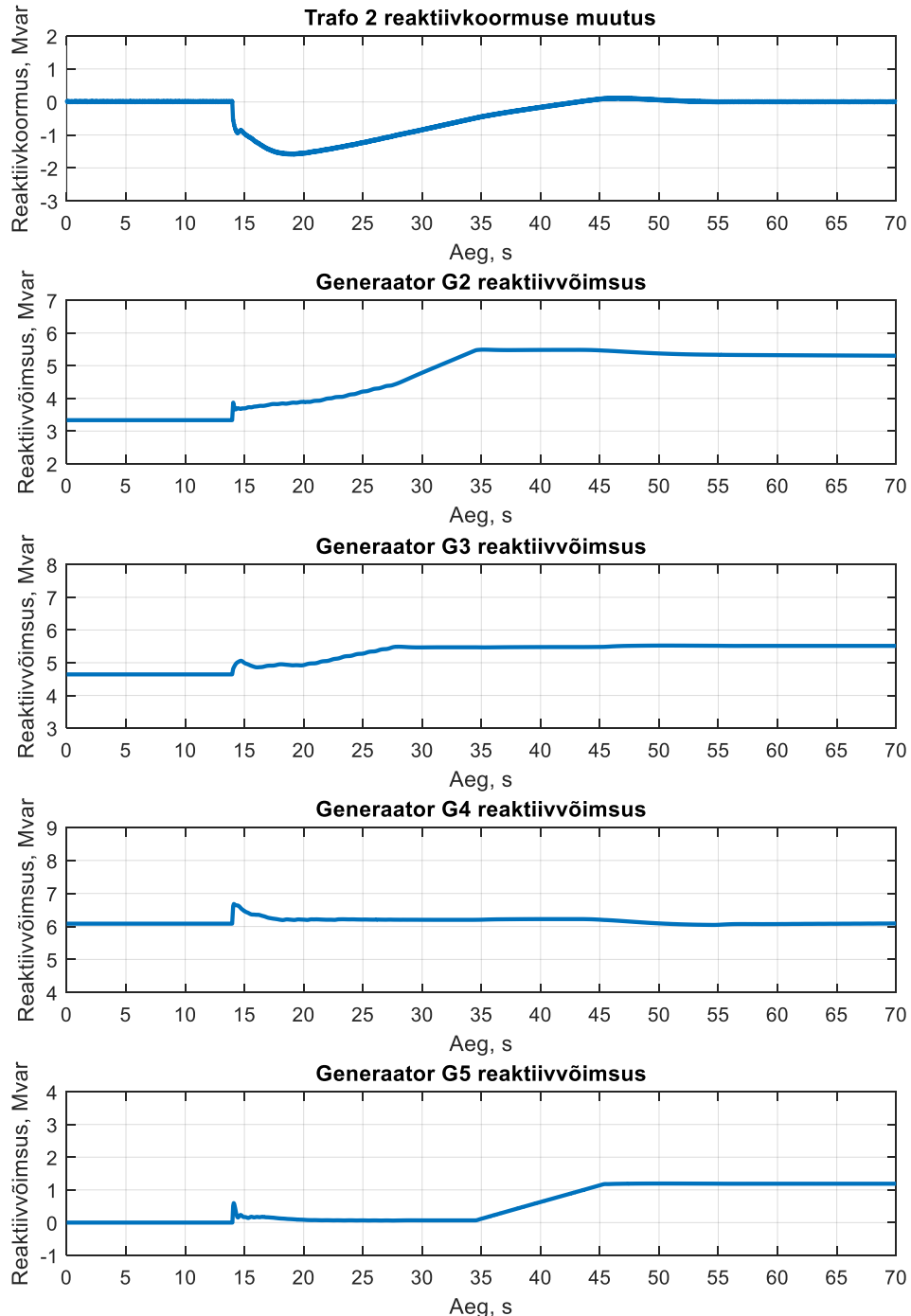


Joonis 3.27. Liitumispunktis mõõdetava reaktiivvõimsuse minimeerimine koormuse langedes

Sellest lähtudes toimus ajavahemikus 17 kuni 23 s generaatori G1 reaktiivvõimsuse alandamine suuruseni null ja edasiselt väheneb juba G2 poolt väljastatav arvuline suurus. Generaator G4 poolt jääb reaktiivvõimsuse genereerimine samasuguseks. Mõlemal eelneval joonisel 3.26 ja 3.27 on

graafikute paremal pool jälgitav stabiilne olek ja situatsioon, milles saavutatakse ülekanetraafode primaarpoolel ehk liitumispunktis mõõdetava reaktiivvõimsuse väärtuseni null viimine.

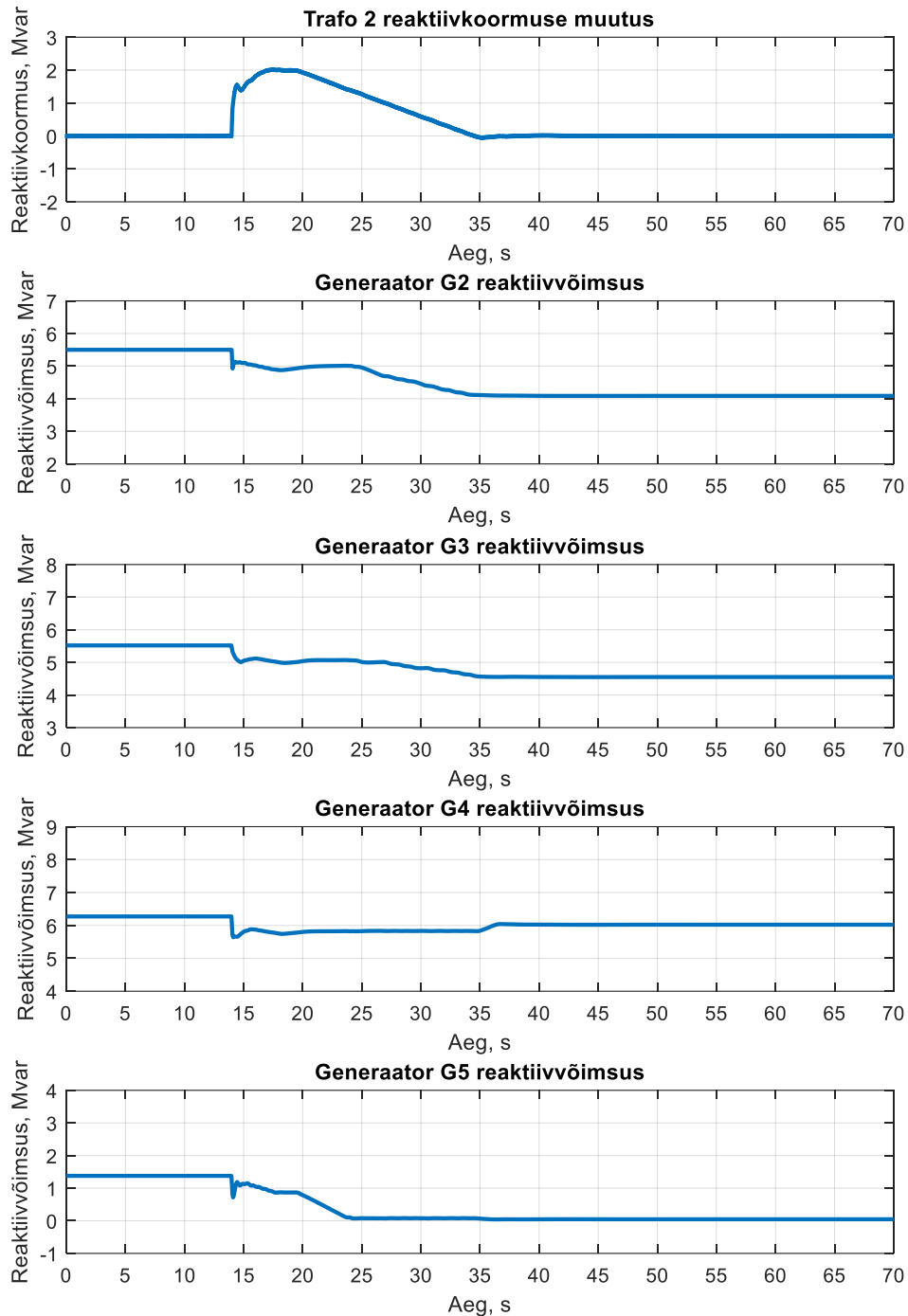
Joonisel 3.28 on esitatud meetodi 5 põhjal toimuv reageering reaktiivkoormuse tõusule suurusega 4 Mvar ja peaesmärgi täitmine kasutades nelja generaatore ergutusüsteemi juhtimist.



Joonis 3.28. Liitumispunktis mõõdetava reaktiivvõimsuse minimeerimine koormuse kasvades

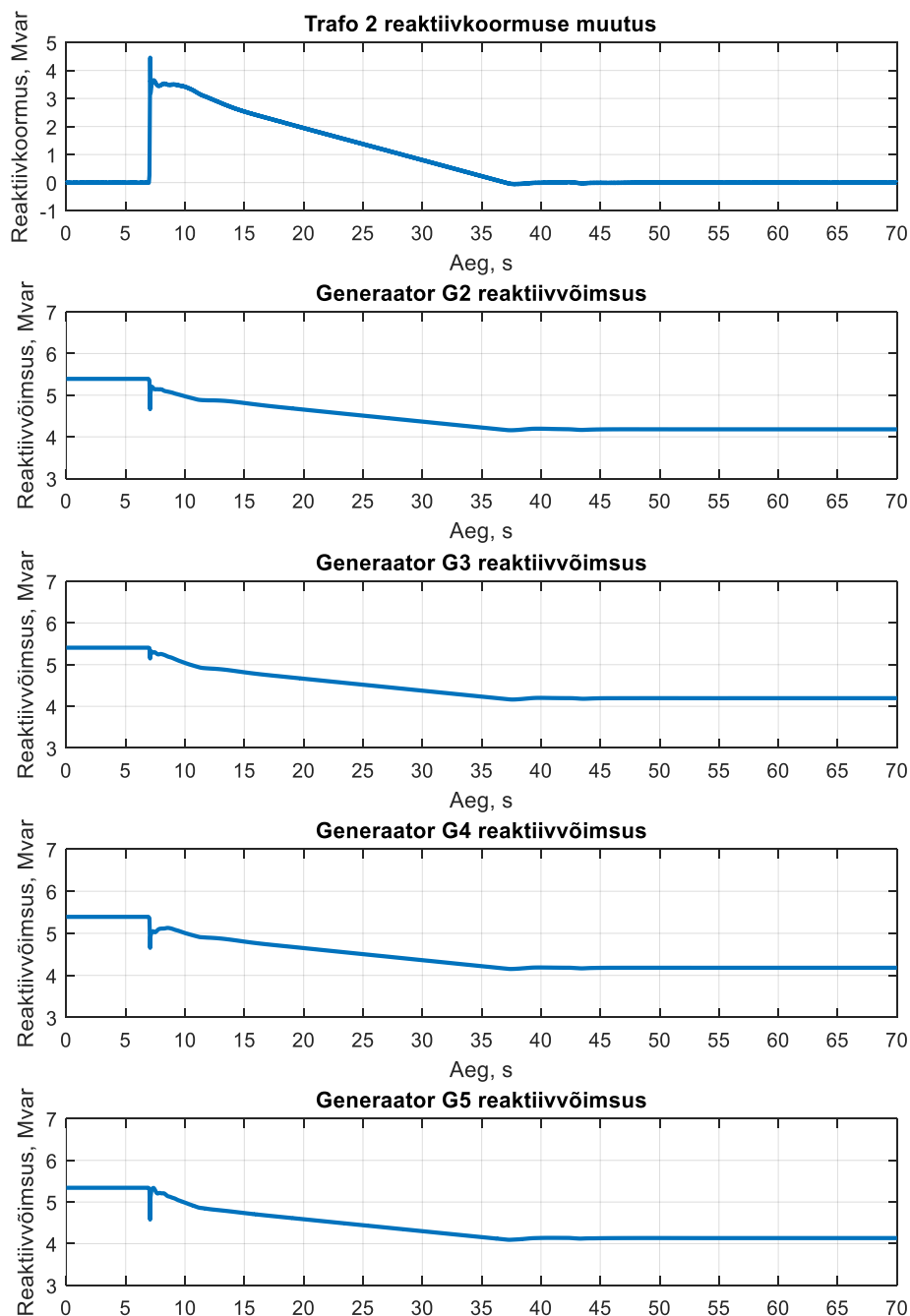
Nõnda kasvab ajavahemikus 14 kuni 28 s nii generaator G2 kui ka G3 reaktiivvõimsus, kuna nende ühendusliinide sisenditest saadavad arvulised suurused on põhimõtteliselt sarnased ja mainitute

omavaheline suhe ehk erinevus muutub küllaltki kiiresti. Seejärel saavutab G3 käesoleva juhul lubatava reaktiivvõimsuse ülempiiri ja edasiselt jätkab reaktiivvõimsuse kasvatamist ainult generaator G2 ajavahemikus 28 kuni 35 s. Edasiselt saavutab ka G2 vastavas generaatorite juhtimissüsteemi seadistustes paika pandud 70% lubatavast reaktiivvõimsuse ülempiirist ja ajavahemikus 35 kuni 45 s toodab ülejäänud reaktiivvõimsuse G5. Hetkest 45 s lõpetatakse reguleerimine ja saavutatakse stabiilne reaktiivvõimsuste genereerimine. Siinkohal G4 väljastatav reaktiivvõimsus ei muutu, kuid on nähtav vähene mõju teiste generaatorite reageerimisperiodil.



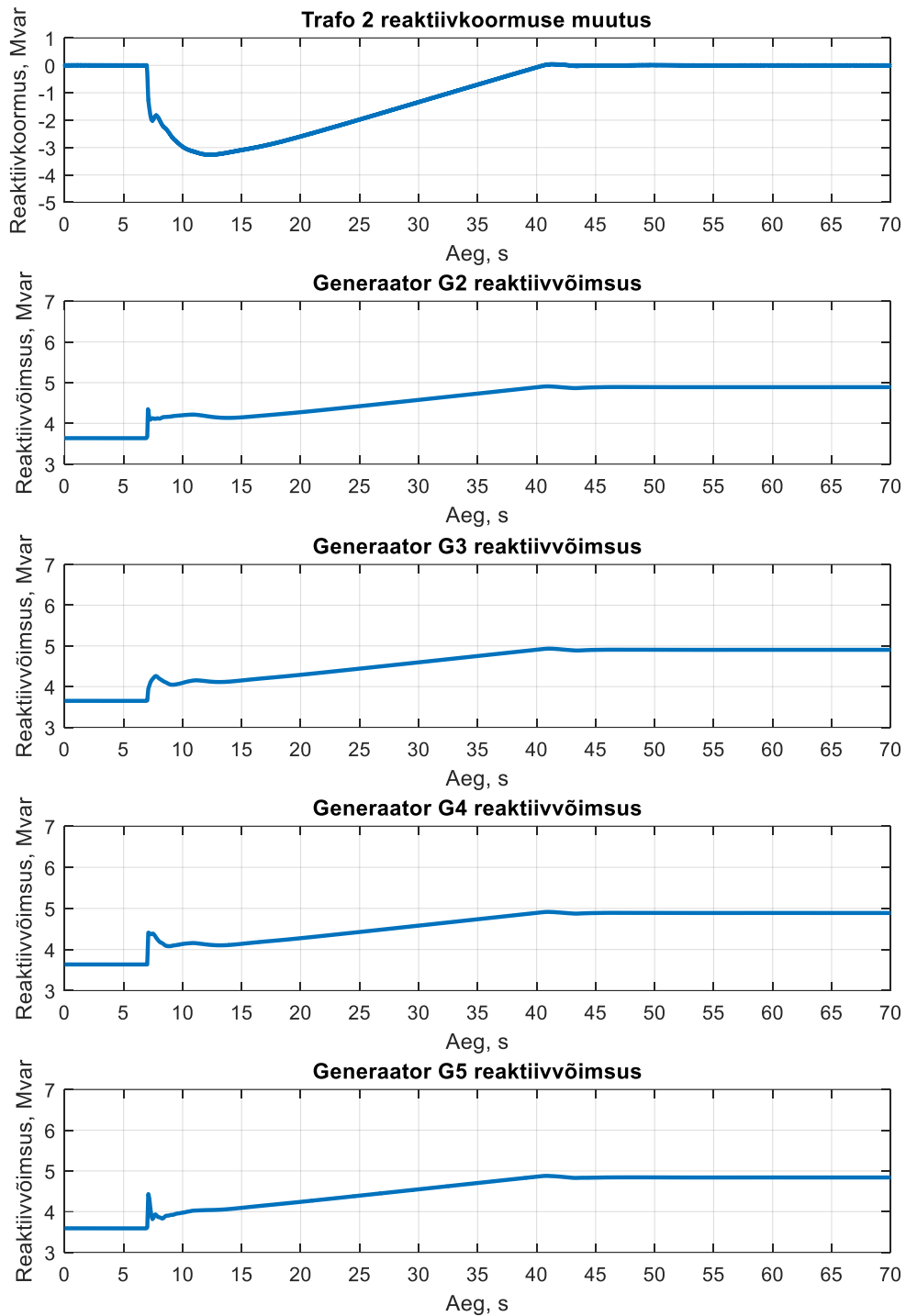
Joonis 3.29. Liitumispunktis mõõdetava reaktiivvõimsuse minimeerimine koormuse langedes

Joonisel 3.29 olevad graafikud ilmestavad reaktiivkoormuse 4 Mvar langusele reageeringut. Esmaselt alaneb generaator G5 reaktiivvõimsus kuni ajahetkeni 24 s. Seejärel vähenevad suhteliselt samaaegselt eelpool mainitud põhjuse tõttu generaatorite G2 ja G3 reaktiivvõimsused ajavahemikus 24 kuni 35 s. Viimase generaatori G4 reaktiivvõimsus ei muutu oluliselt. Käesolevalt oli tegemist kahe sektsiooni omavahelise kokku ühendatavusega ja seetõttu on pärast reaktiivkoormuse muutumist pikem üleminekupiirkond ajavahemikus 14 kuni 20 s. Joonisel 3.30 esitatakse meetod 1 ehk reaktiivvõimsuste võrdelise jagamise järgi toimuv reguleerimine ja liitumispunkti peaesmärgi täitmine.



Joonis 3.30. Liitumispunkti mõõdetava reaktiivvõimsuse minimeerimine koormuse langedes

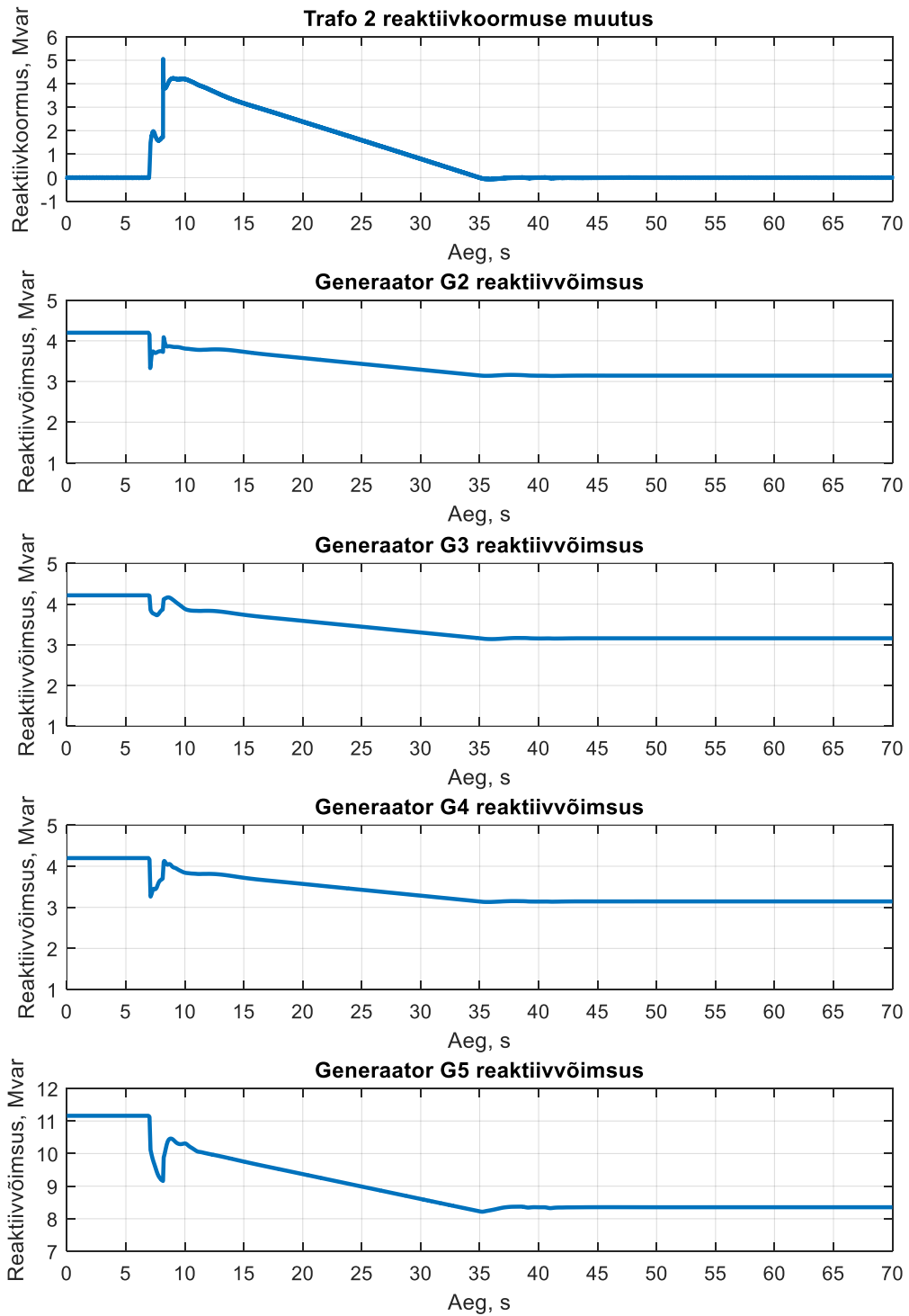
Nõnda vähendatakse kõigi valikus olevate generaatorite reaktiivvõimsust samaaegselt ajavahemikus 10 kuni 37 s, mispeale saavutatakse stabiilne olek. Sarnaselt on järgneval joonisel 3.31 esitatud sama meetodi põhine reaktiivvõimsuste üheaegne suurendamine nelja generaatoriga ajavahemikus 13 kuni 40 s.



Joonis 3.31. Liitumispunktis mõõdetava reaktiivvõimsuse minimeerimine koormuse kasvades

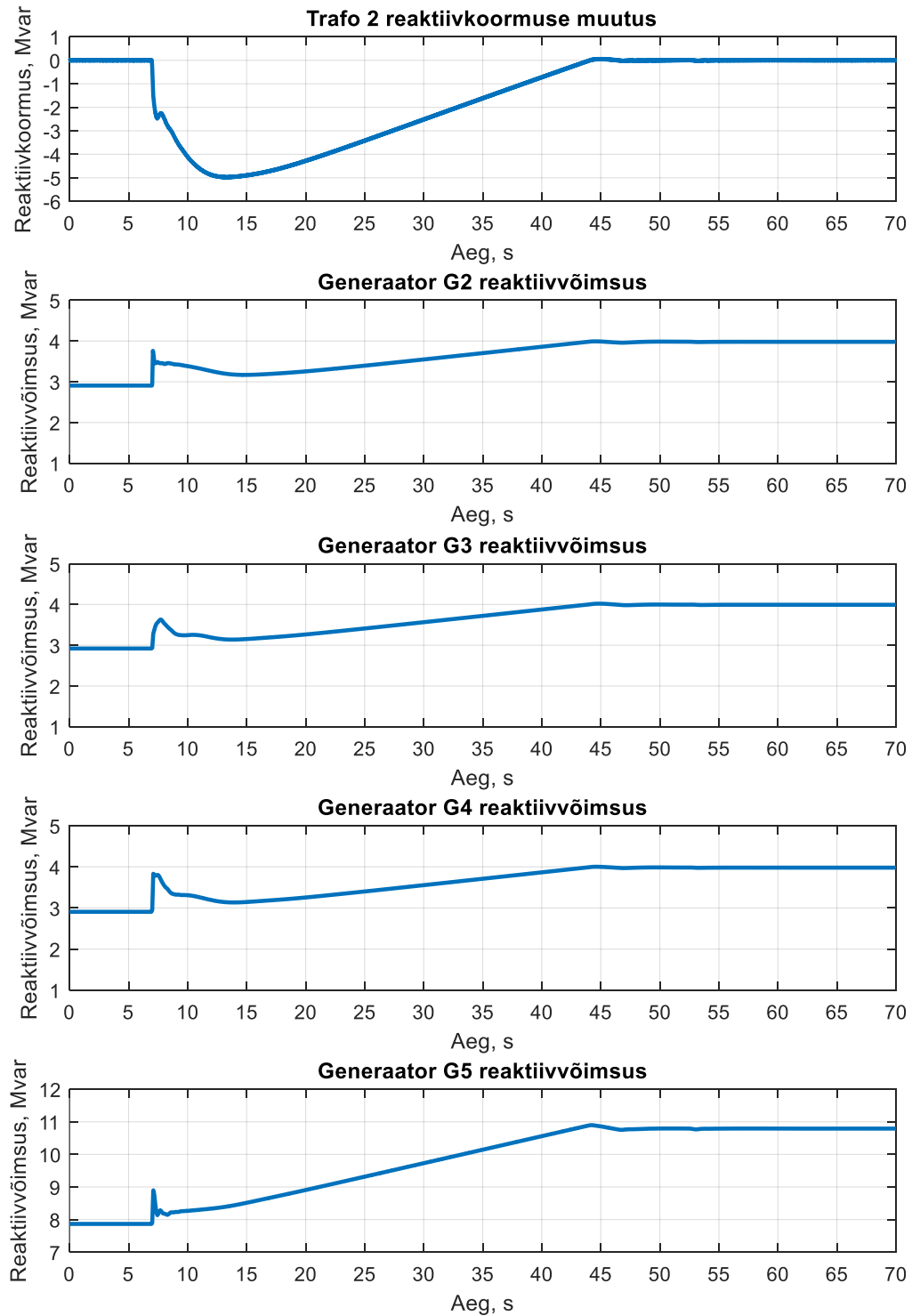
Joonisel 3.32 toimub reaktiivvõimsuste proportsionaalse jagamise põhimõttel generaatorite reaktiivvõimsuste vähendamine tarbijate koormuse langemisel suuruse 5 Mvar võrra. Sedamööda

alanevad kõigi nelja generaatori G2, G3, G4 ja G5 reaktiivvõimsused küll samas ajavahemikus 10 kuni 35 s, kuid lähtuvalt sellest, et G5 niminäivvõimsus ja tulenevalt viimasest ka lubatava reaktiivvõimsuse ülempiir on üldistades kolm korda suurem ülejäänutest, väheneb generaator G5 poolt väljastatav reaktiivvõimsus rohkem kui teistel.



Joonis 3.32. Liitumispunktis mõõdetava reaktiivvõimsuse minimeerimine koormuse langedes

Järgneval joonisel 3.33 on vaadeldav vastupidine situatsioon, milles elektrijaama seesmine reaktiivvõimsuse nõudlus suureneb 5 Mvar võrra. Nõnda tõstavad kõik neli generaatorit oma reaktiivvõimsust ühiselt ajavahemikus 12 kuni 44 s, aga generaator G5 oma suuruse ja võimekuse tõttu teeb seda ligilähedaselt kolm korda kiiremini. Sarnaselt eelnevate graafikutega on ka siinkohal saavutatav ühtlane reaktiivvõimsuse genereerimine peale reguleerimisperioodi lõppu.



Joonis 3.33. Liitumispunktis mõõdetava reaktiivvõimsuse minimeerimine koormuse kasvades

Kokkuvõtlikult võib sätestada, et käesolevas peatükis vaadeldud meetodid annavad võimaluse hoida reaktiivvõimsuse vahetuse liitumispunktis piisavalt madalal, et välistada Elering AS poolt nõutavat tasu reaktiivvõimsuse eest. Arusaadavalt sõltub viimane ikkagi elektriijaama sisemisest nõudlusest ja reaktiivvõimsust genereerivate generaatorite võimekusest. Tasub mainida, et siinkohal näivad olukorrad, milles kõik valikus olevad generaatorid üheaegselt mingis koguses reaktiivvõimsust toodavad, vähendavat generaatorite teineteise tasakaalustamist. Teisest küljest muudavad elektrivõrgus ja seega elektriijaamas toimuvad lülitus- ning siirdeprotsessid generaatorite omavahelised võrdlussuhteid lähtudes esmasest reguleerimise algusest ja seetõttu meetodite 1, 2 ja 3 järgi reguleerides osutub pigem vajalikuks lisada täiendavaid lülisid. Viimased peavad aeg-ajalt taastama generaatorite omavahelise suhtelise erinevuse. Meetodite 4 ja 5 kasutamine aga põhineb ainult ühe generaatori korraga reguleerimisel ja seetõttu kirjeldatud olukorda ei kaasne ning muutused tarbijate koormuses ning nendele reageerimine omakorda kõrvaldavad teatud aja jooksul tekkinud mitteoptimaalsed situatsioonid.

3.6 Majanduslik-tehniline analüüs

Tulenevalt sellest, et Elering AS võtab tasu põhivõrgu ja tarbija ehk käesoleval juhul elektriijaama vahelises liitumispunktis mõõdetava ning sellest mõlemas suunas läbimineva reaktiivvõimsuse eest, vajab siinkohal üle vaatamist võimalik tekkiv majanduslik kasu, kui see hoitakse võimalikult madalal. Käesolevas peatükis asetsevatele graafikutele tuginedes on saavutatav täielik sõltumatus trafode kaudu ülekandevõrgust võetavate või edastatavate reaktiivvõimsuste koguste osas. Seda arusaadavalt olukorran, milles pole võimalik kohapeal reaktiivvõimsust genereerida või tarbida.

Lähtudes Elering AS poolt sätestatud reaktiivenergiatasust 1,54 EUR/Mvarh ilma käibemaksuta [15], kujunevad põhivõrgule makstavad summad järgnevatiks ning need on esitatud tabelis 3.5. Muuhulgas ostab ja müüb Elering AS pingereguleerimise teenuse osutajatele reaktiivenergiat ajal, kui teenust osutava elektriijaama pinge hoidmise funktsioon on aktiveeritud, hinnaga 0,64 EUR/Mvarh [15]. Viimane on teatud objektide või tööstuskomplekside jaoks, mis omavad kohapealset reaktiivvõimsuse genereerimise võimekust, üheks põhivõrguga koostöö tegemise aspektiks.

Järgnevast tabelist 3.5 nähtub, et aastased tasud reaktiivvõimsuse eest võivad osutada küllaltki märkimisväärseteks. Võttes eeldusena, et kas või käesoleva magistritöö raames alusena võetud VKG OÜ omanduses oleva elektriijaama vajatava reaktiivvõimsuse vähendamine 10 kuni 15 Mvar võrra annab tõsiseltvõetava ressurside kokkuhoiu. Tegelikult juba mõne Mvar ulatuses

reaktiivvõimsuse põhivõrgust tarbimise alandamine omab suhteliselt suurt tähendust. Nõnda võib säärane lahendus olla huvipakkuvaks veel väiksematele objektidele.

Tabel 3.5. Reaktiivvõimsuse maksumuse sõltuvus selle kogusest

Reaktiivvõimsus, Mvar	Reaktiivenergiatasu, EUR/Mvarh	Maksumus päevas, EUR	Maksumus aastas, EUR
1	1,81	43,61	15918,67
2	3,63	87,22	31837,34
3	5,45	130,83	47756,01
4	7,26	174,45	63674,68
5	9,08	218,06	79593,36
6	10,90	261,67	95512,03
7	12,72	305,28	111430,70
8	14,53	348,90	127349,37
9	16,35	392,51	143268,04
10	18,17	436,12	159186,72
11	19,98	479,74	175105,39
12	21,80	523,35	191024,06
13	23,62	566,96	206942,73
14	25,44	610,57	222861,40
15	27,25	654,19	238780,08

Arusaadavalt tuleb alguses teha investeeringud ja soetada vajalikud seadmed ehk põhimõtteliselt generaatorite reaktiivvõimsuste reguleerimist võimaldav tööstuskontroller või isegi mitu nendest. Samuti on vajalik hankida tööstuskontrollerile toimiv tarkvaraline lahendus, mis seda teha lubaks. Seega peab teoreetiliselt kas säärase juhtimissüsteemi ise konstrueerima ning seda katsetama või tellima terviklahenduse. Muuhulgas on oluline VAR-regulaatorite olemasolu, et oleks üldse võimalik generaatorite ergutussüsteeme reguleerida. Need saab muidugi täiendavalt generaatoritele juurde lisada või lasta paigaldada koos ülejäänud juhtimissüsteemiga.

Käesoleva magistr töö raames rakendatakse edasises peatükis 4 kirjeldatud National Instrumentsi CompactRIO ehk cRIO tööstuskontrollerit 9045, mille maksumus ületab natuke nelja tuhandet

eurot. Üldjoontes jäävad näitena National Instrumentsi CompactRIO ehk cRIO tööstuskontrollerite maksumused vahemikku 4000-8000 eurot. [41] Lisaks võib osutada vajalikuks juurde hankida täiendavaid sisend- ja väljundmooduleid. Viimaste kogus sõltub reguleeritavate generaatorite ja mõõteandmete hulgast. Samuti on tänapäeval võimalik kasutada mõnda IEC või GOOSE andmeedastusprotokolli.

Siinkohal puudub otsene teave, kui suureks võib osutada ühe generaatorite reaktiivvõimsuste juhtimissüsteemi terviklahenduse kogumaksumus. Samas, tuginedes tabelile 3.5, võib öelda, et objektile aastase keskmise reaktiivkoormusega 5 Mvar osutub säärase tellimuse tasuvusaeg suhteliselt lühikeseks, jäädes tõenäoliselt alla aasta. Üldistades näib pigem sellise juhtimissüsteemi omamine olevat kasumlik, seda ka väiksemate ettevõtete jaoks. Muuhulgas saab siis osutada kas või pingereguleerimise teenust Elering AS soovil ja sobiva võrgukonfiguratsiooni ning situatsiooni olemasolul.

Peatükis 3.5 asetseval joonisel 3.24 oli vaadeldav viie erineva generaatorie vahel reaktiivvõimsuste eristamise meetoditega saavutatav aktiivvõimsuskadude vähendamine generaatorite ja kogumislattide vahelistes ühendusliinides. Siinkohal tehakse kokkuvõtlik järeldus ning vaadeldakse nende resultaatte aastases lõikes. Ülevaate sellest annab tabel 3.6.

Tabel 3.6. Aktiivvõimsuskadude suurus tulenevalt generaatorite eristamise meetoditest

Meetod	Genereeritav reaktiivvõimsus, Mvar				
	5	10	15	20	25
	Aktiivvõimsuskadu aastas, MW				
1	545.67	551.64	561.59	575.51	593.41
2	545.67	551.64	561.59	572.67	589.05
3	545.67	551.64	561.59	572.67	591.85
4	551.22	563.05	580.46	609.41	638.21
5	545.67	551.07	559.75	572.18	587.99

Nõnda võib järeldada, et küllaltki tavapärastes tingimustes, milles pole kohapealses elektrivõrgus väga tihedalt toimuvad lülitus- ning siirdeprotsesse ning rakendatav juhtimissüsteem on suhteliselt optimaalne, väga suuri erinevusi meetodite võrdluses ei esine. Kõige märgatavamad vahemikud esinevad meetod 4 osas. Selle järgi reguleerides, sõltuvalt muidugi generaatorite võimsusest, tekib enim aktiivvõimsuskadusid, nagu ka sai väita joonise 3.24 põhjal. Tegemist on siinkohal ikkagi aluspõhjuna kasutatud elektrijaama kui näidet esile tuues. Samas võib eeldada, et mõningates

väiksemates objektides saavad erinevused olema veel väiksemad. Võttes ühena meetodi 5 kui kõige efektiivsema, siis on märgatavad kuni viie MW väiksemate aktiivvõimsuskadude saavutamine võrreldes meetoditega 1, 2 ja 3. Seda ka ikkagi aastaringset keskmiselt rohkem kui 15 Mvar reaktiivenergiat genereerides. Meetodi 4 suhtes on muidugi vahed suuremad ning seetõttu võib säärase lähenemisviisi kõrvale jätta.

Järgnevas tabelis 3.7 peatutakse korra ülekanetraafode C1T ja C2T ning generaatorite jaotlate 1S ja 2S ehk ühendusliinides L6 ja L7 tekkivate aktiivvõimsuskadude võrdlemisel sõltuvalt nende kaudu edastavast reaktiivvõimsusest. Kuna mõlemad liinid on samade parameetritega, siis on võimalik need võtta ühtsena ja tulemused summeerida. Generaatorite aktiivvõimsusena kasutatakse suurust 90 MW, mis iseloomustab ka joonisel 3.24 alusena võetavat situatsiooni.

Tabel 3.7. Aktiivvõimsuskadude suurus trafode ja generaatorite jaotlate vahelistes ühendustes

<i>Q, Mvar</i>	<i>ΔP, kW</i>
1	308.53
2	308.65
3	308.84
4	309.11
5	309.45
6	309.87
7	310.36
8	310.93
9	311.58
10	312.30
11	313.10
12	313.98
13	314.93
14	315.96
15	317.07
16	318.25
17	319.50
18	320.84
19	322.25
20	323.73

Kokkuvõtlikult saab tõdeda, et põhivõrguga seonduvas liitumispunktis reaktiivvõimsuse vahetamise minimeerimine on sobivate objektide jaoks täiesti õigustatud otsus või vähemalt nõuab kaalumist. Teisest küljest pole jällegi VKG OÜ elektriyaamale tuginedes väga mõjuvaid põhjuseid ühe generaatorite vahel reaktiivvõimsuste jaotamise konkreetse meetodi eelistamisel muudele ainult reaktiivvõimsuskadude põhjal. Pigem tuleb siinkohal vaadelda teisi parameetreid ja kitsendusi. Samuti tasub igale erinevale objektile läheneda omamoodi. Muuhulgas võib veelkord lisada, et vähendades trafode kaudu liikuvat reaktiivvõimsust, langevad ka reaktiivvõimsuskadod trafode ja generaatorite jaotlate vahelistes liinides. Viimasel on olulisemalt suurem mõju üleüldistele energiakadudele, kuid kuna need ühendused on ühtsed mitmete generaatorite jaoks, siis ei muuda otseselt generaatorite eristamised selles midagi.

Olukorras, milles hoitakse liitumispunktis mõõdetavat reaktiivvõimsust arvulise suuruse null ligiduses, peab tulema trafode ja liinidel olevate reaktorite jaoks reaktiivvõimsus generaatoritelt ning seetõttu reaktiivkomponendi edastamist vastavates liinides täiesti vältida ei saa. Juhul, kui suudetakse näitena nendes ühendustes vähendada üldise juhtimissüsteemi kaasabil reaktiivvõimsuse kogust 10 Mvar asemel suuruseni üks Mvar ehk 90%, siis langevad reaktiivvõimsuskadod 3,77 kW, tuginedes tabelile 3.7. Aastas hajub seetõttu kokkuvõtlikult 33 MW vähem energiat. Võttes aga generaatorite poolt väljastatava reaktiivenergia suuruseks 20 Mvar ning oletades, et 19 Mvar sellest ei liigu enam läbi nende kahe peamise ühenduse, alanevad reaktiivvõimsuskadod 15,2 kW ning aasta lõikes osutub see resulteeruvaks suurusena 133 MW.

Ühest küljest ei ole need numbrid väga suured, samas saavutatakse seeläbi teatud energia kokkuhoid. Mõistetavalt langevad üldised reaktiivvõimsuskadod, kui generaatorid toodavad vähem reaktiivenergiat, kuid kuna tegemist on elektriyaamaga, siis eeldatavalt peaksid generaatorid toimima maksimumi lähedal. Nõnda võib ennekõike öelda, et esmane on ikkagi Elering AS liitumispunktis minimeeritava reaktiivvõimsuse maksumuse võimalikult ulatuslik vähendamine ning teisena suudetakse seda tehes langetada ka elektrivõrgu seesmistes ühendustes tekkivaid reaktiivvõimsuskadusid.

4. ÜHE GENERAATORI REAKTIIVVÕIMSUSE JUHTIMINE

Praeguse magistritöö peatüki 3 raames tehti ülevaade RSCADis modelleeritud mitme generaatori reaktiivvõimsuste juhtimise süsteemist ja selle rakendamisest ning saadud tulemustest. Siinkohal liigutakse aga samm edasi ja kasutatakse vastavat lahendust reaalses tööstuskontrolleris. Viimast on võimalik juba otseselt ühendada elektrijaamaga, kuid arusaadavalt enim vajalikke sisendeid ja parameetreid seadistades.

Teoreetiliselt lubas reaalaaja simulaatori kasutamine luua reaalselt elektrijaama iseloomustava ligilähedase keskkonna. Teisest küljest ei võtnud see otseselt arvesse tööstuskontrolleri omatoimeaega ja riist- ning tarkvaralisi piiranguid. Mõistetavalt sõltub väga palju ka vastava seadme enese võimekusest ning ühendustest. Käesolevat kasutatakse suhteliselt tuntud tootja National Instrumentsi tööstuskontrollerit, mis osutub piisavalt sobilikuks ettevõetava eesmärgi täitmisel.

Tuleb mainida, et edaspidiselt kirjeldatav lahendus koostati siiski ainult ühe generaatori reaktiivvõimsuse reguleerimiseks ning sellele toetuti arendustegevuse edasiviimisel. Samas, tuginedes RSCADi ülesehitusele, saab vajadusel erinevaid mõõteväärtuseid võrdlevad ja neid täiendavad lülid kogumid juurde lisada. Kuna vastavad väljundid on ennekõike olekud, siis üleüldist PI- ja osakaalude regulaatorite toimimist peale lubavate lülituste need ei mõjuta. Viimaseid asendati katseseeriade käigus fikseeritud ja nende muutuseid simuleerivate käsklustega. Lõppkokkuvõttes on rakendatav konstruktsioon mõeldud ikkagi viie generaatori eraldiseisvaks juhtimiseks ja põhineb peatükis 3 paika pandud põhimõtetele.

4.1 Tööstuskontroller NI cRIO 9045

National Instrumentsi CompactRIO ehk cRIO tööstuskontrollerid [42] on mõeldud kasutamiseks reaalaaja juhtumissüsteemides. Need kontrollerid omavad kombinatsiooni reaalaaja mooduliga kontrollerist, ümberkonfigureeritavatest sisend/väljund moodulitest, FPGA moodulist ja kontrolleri kerest, millel on kas 4 või 8 laiendusmooduli pesa. Seda on võimalik programmeerida nii graafilise programmeerimiskeelega LabVIEW kui ka C ja C++ programmeerimiskeeltega [43]. Kontroller ise baseerub Linuxil põhinevale reaalaaja operatsioonisüsteemile NI Linux Real-Time. LabVIEW keskkonnas kirjutatud programmikoodid kompileeritakse seadmes automaatselt, kui kasutaja laeb koodi kontrollerisse. Valikus on kolm programmeerimisrežiimi, milledest ühe eelistamine sõltub konkreetse projekti vajadustest.

Joonisel 4.1 on toodud käesolevas modelleerimises kasutatud NI cRIO 9045 kontrolleri. Antud seade [44] kasutab kahetuimalist Intel Atom E3930 protsessorit, 2 GB DDR3L muutmälu ja 4 GB salvestusmahtu (SSD). Kontrolleriil on kaks Gigabit Ethernet pesa, millega on võimalik ühilduda arvutivõrku. Lisaks on sellel veel kolm USB pesa, millest 2 on USB 3.1 Gen 1 tüüp C (ühte neist on võimalik kasutada ka DisplayPort'ina). Võimalik on rakendada ka Serial porte, valikus on RS-232 ja RS-485. FPGA moodul ise baseerub Xilinx Kintex-7 7K70T kiibil.



Joonis 4.1. Tööstuskontroller NI CompactRIO 9045 [45]

Laiendusmoduleid on võimalik lisada alates analoog pinges sisenditest kuni näiteks erinevate sideprotokollideni välja ning nende valik sõltub konkreetse projekti vajadustest. Joonisel 4.2 on käesolevas projektis kasutatud analoogsisend- ja väljund moodulid NI 9205 ja NI 9263.

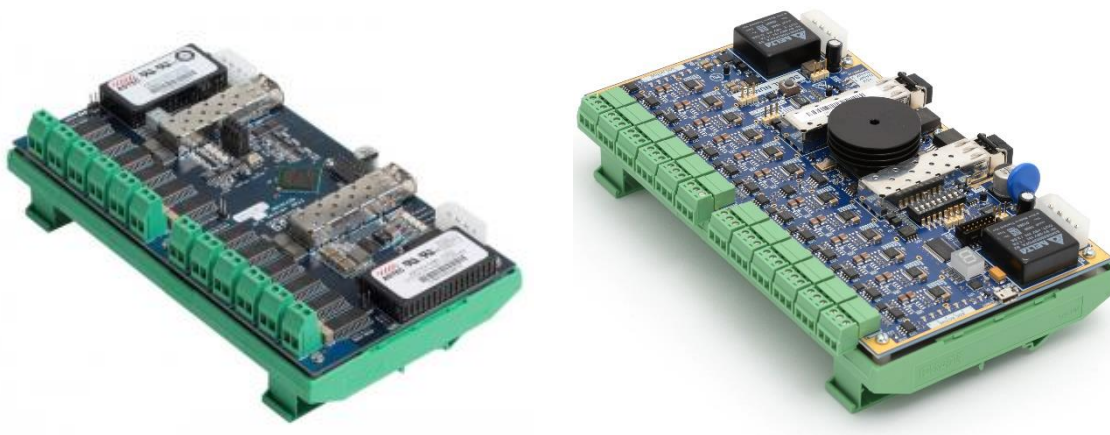


Joonis 4.2. Analooisisendite moodul NI-9205 (vasakul) [46] ja analoogväljund moodul NI-9263 (paremal) [47]

NI 9205 analooisisendite moodul [48] on mõeldud spetsiaalselt CompactRIO kontrolleri jaoks ning sellel on kokku 16 mõõtekanaali, kui mõõtmised on eristavad (ing.k. *differential*), ja 32, kui mõõtmised on ühe otsaga (ing.k. *single-ended*). Sisendsignaali diapason on ± 10 V ning maksimum sampsite arv on 250 kS/s (kilosämplit sekundis). Samuti on moodulil 16-bitine A/D konverter. Kasutades ± 10 V pinges vahemiku on selle absoluutne mõõtetäpsus 6,23 mV ning mõõtetundlikkus 0,096 mV, iseloomustades väikseimat pinges muutust, mida on võimalik märgata.

NI 9263 analoogväljundite moodul on mõeldud samuti kasutamaks CompactRIO kontrolleres ning sellel on kokku 4 väljundkanalit, millede diapason on ± 10 V ning maksimum sãmplite arv 100 kS/s. Lisaks on moodulil 16-bitine D/A konverter ja mainitu täpsus on labori tingimustes 0,03% näidust ning 0,1% pinge diapasonist.

Teabe RTDSist välja ja sisse saatmiseks kasutatakse analoogsignaale, mis tähendab, et andmete vahetus RTDSi ja näitena kontrolleri vahel käib läbi analoogpingete. Nii GTA0 kui ka GTAI puhul on ühel kaardil 12 kanalit [40], millel igal ühel on oma konverter. Kaartide D/A (GTA0 puhul) ja A/D (GTAI puhul) konverterid on 16-bitised, 1 μ s diskreetimise sagedusega. Analoogsignaalide diapason on ± 10 V. Kirjeldatud komponendid on esitatud joonisel 4.3.

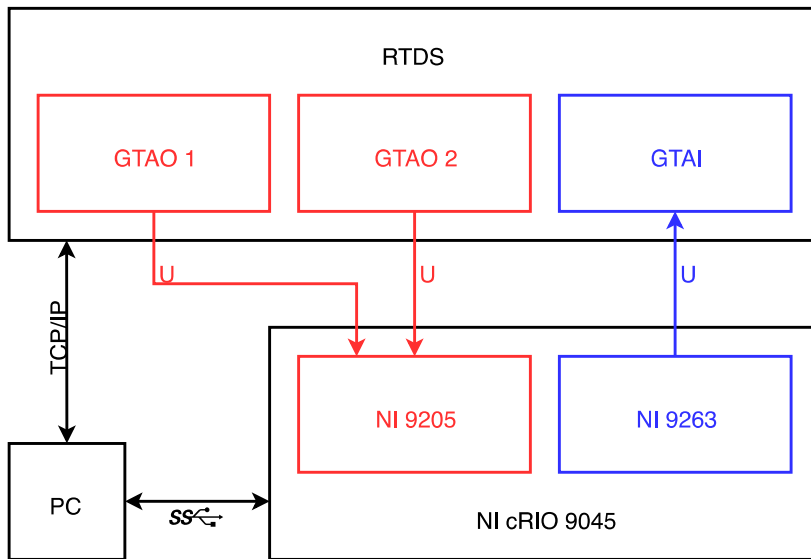


Joonis 4.3. RTDSi analoogv aljund (vasakul) ja –sisend (paremal) kaardid [49]

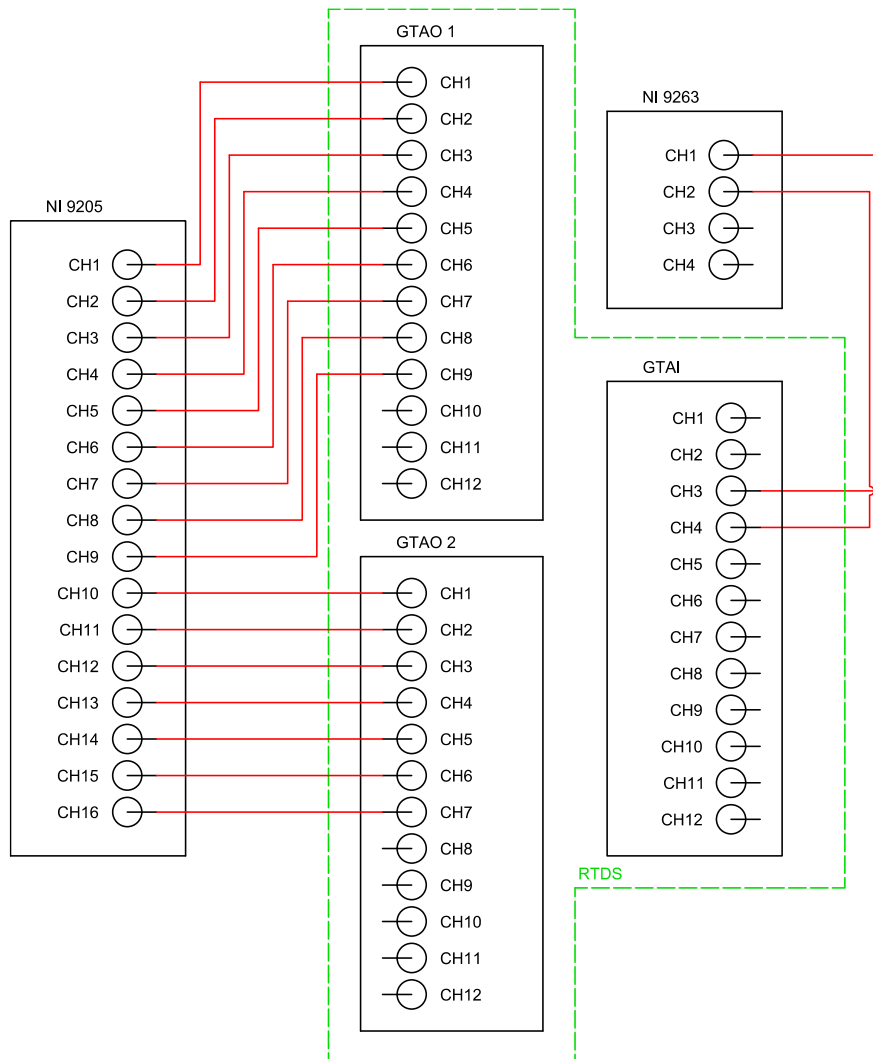
4.2 Koostatud katsestend

Koostatud katsestend asub Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi elektrisüsteemi laboris ja koosneb reaalarjasimulaatorist ning t oostuskontrollerist. Lisaks on kasutusel lauarvuti, mis täidab stendi esipaneeli eesmärki ja on mõeldud ka LabVIEW ja RSCAD programmide kasutamiseks. Nendest esimest kasutatakse kontrolleres jooksva algoritmi koostamiseks ja selle sinna laadimiseks. Teine on vajalik uuritava elektrisüsteemi mudeli koostamiseks ja simulatsiooni juhtimiseks. Stendi põhimõtteline skeem on toodud joonisel 4.4.

Vastavalt skeemilt on näha, et RTDSi ja kontrolleri vahelisel andmevahetusel kasutatakse analoogkanaleid. RTDSist andmete edastamiseks rakendatakse kahte GTA0 kaarti, millest kokku kasutatakse 16 analoogkanalit. Kontrolleri poolt võetakse andmed vastu analoogsisendite mooduliga NI-9025 ning saadetakse välja analoogsignaale analoogsignaale mooduliga NI-9263. Lauarvuti on ühendatud RTDSiga üle arvutivõrgu ning kontrolleri USB kaudu ja nende vahelised ühendused on täpsemalt toodud joonisel 4.5, edastavad v aartused on kirjeldatud sellest allpool ning laboris oleva ja juhtmetega RTDSiga ühendatud kontrolleri on toodud joonisel 4.6.



Joonis 4.4. Koostatud katsestendi põhimõtte skeem



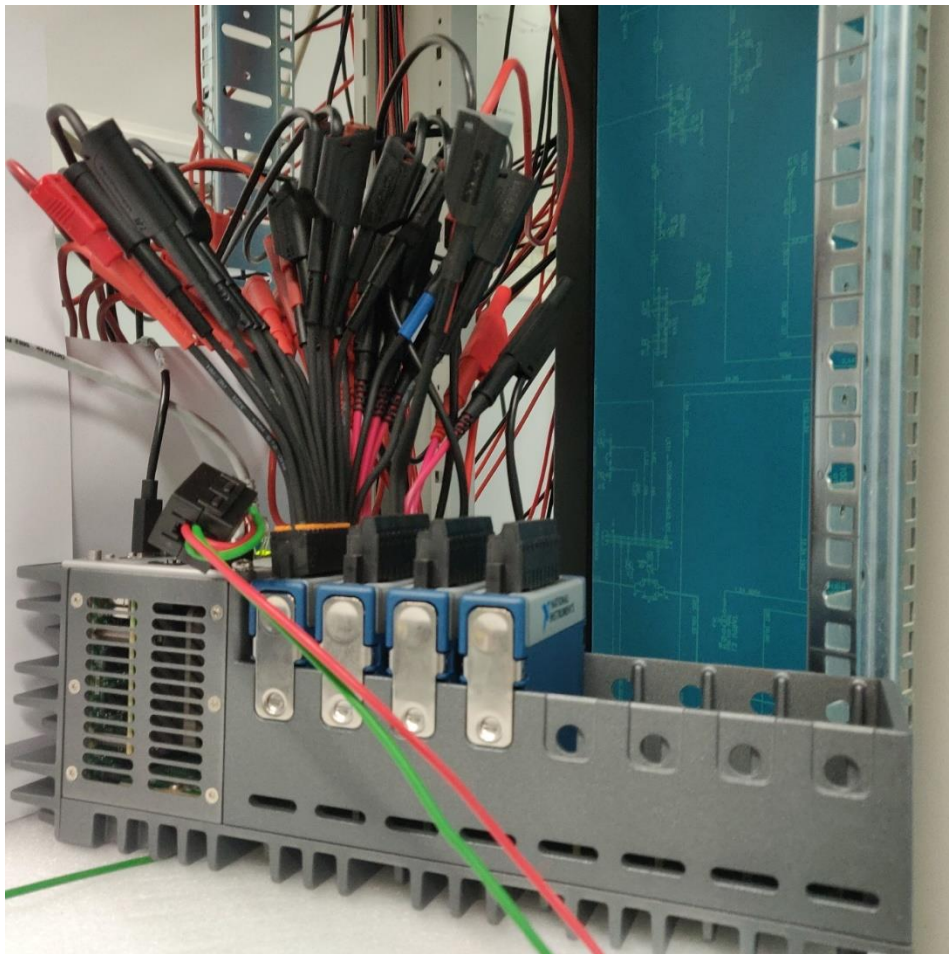
Joonis 4.5. RTDSi ja NI cRIO 9045 vaheliste ühenduste skeem

Kontrollerisse edastatakse järgmised väärtused:

- kanal 1: trafo T1 reaktiivkoormus suhtühikutes (primaarpinge, kui pingejuhtimisel);
- kanal 2: trafo T2 reaktiivkoormus suhtühikutes (primaarpinge, kui pingejuhtimisel);
- kanal 3: generaatori G1 aktiivvõimsus;
- kanal 4: generaatori G1 reaktiivvõimsus;
- kanal 5: elektriijaama 1. sektsiooni (1s) latipinge;
- kanal 6: elektriijaama 2. sektsiooni (2s) latipinge;
- kanalid 7-14: võimsuslülitite asendid;
- kanal 15: Eleringi juhtimine;
- kanal 16: Eleringi sätteväärtused.

Kontrollerist saadetakse välja järgmised väärtused:

- kanal 1: generaatori G1 reaktiivvõimsuse reguleerimise käsk;
- kanal 2: generaatori G1 klemmpinge reguleerimise käsk, kui sisse on lülitatud Eleringi poolne pinge juhtimine.

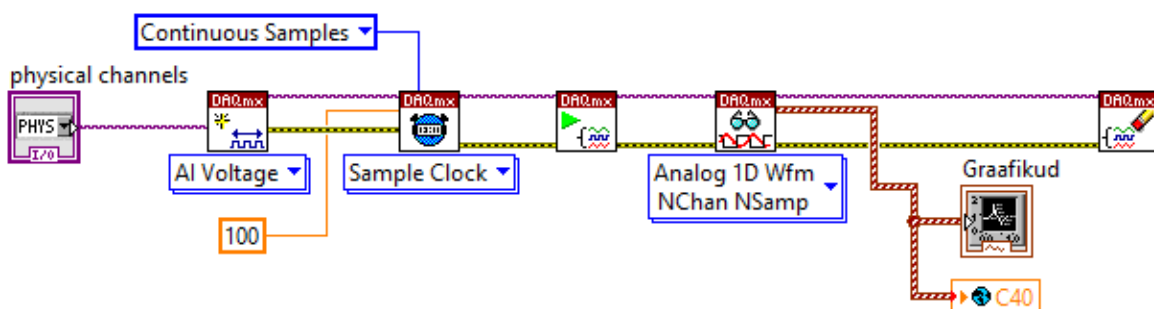


Joonis 4.6. NI cRIO 9045 tööstuskontroller elektrisüsteemide laboris

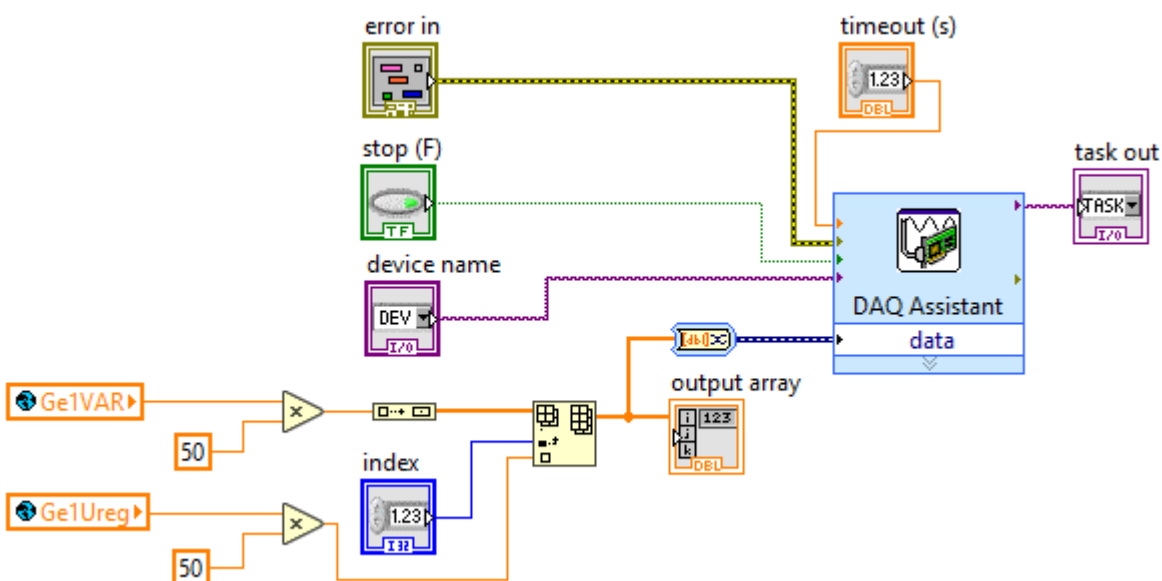
4.3 Kontrolleri programmipõhine ülesehitus

Edasiselt on kirjeldatud ühe generaatori reaktiivvõimsuse juhtimiseks ja sellega kaasneva liitumispunktis mõõdetava reaktiivvõimsuse vahetuse minimeerimiseks LabView põhise graafilise programmeerimiskeelega konstrueeritud lahendust. Otseselt ei käsitleta siinkohal aga kontrolleri ehk põhimõtteliselt generaatori reaktiivvõimsuse regulaatori sisse või väljalülitamisi, kuna see sõltub ennekõike kasutatavast seadmest ja modelleerimisprogrammist. Samas tuuakse siiski välja vajalikud olekud ja seonduvad sisendid, mida läheb vaja reaktiivvõimsuse reguleerimise alustamisel ja peatamisel.

Joonisel 4.7 on esitatud võimalik versioon generaator G1 reaktiivvõimsuse reguleerimise eesmärgil kasutatavate arvuliste väärtuste saamise jaoks. Nõnda rakendatakse NI kontrolleri saabuval ühendusel, mida selgitati joonise 4.5 juures, et tekitada ühtne arvvektor C40. Viimasest võetakse konstrueeritud juhtimissüsteemi poolt vajaminevad elemendid, mille kaudu reguleeritakse generaatori reaktiivvõimsuse genereerimist.



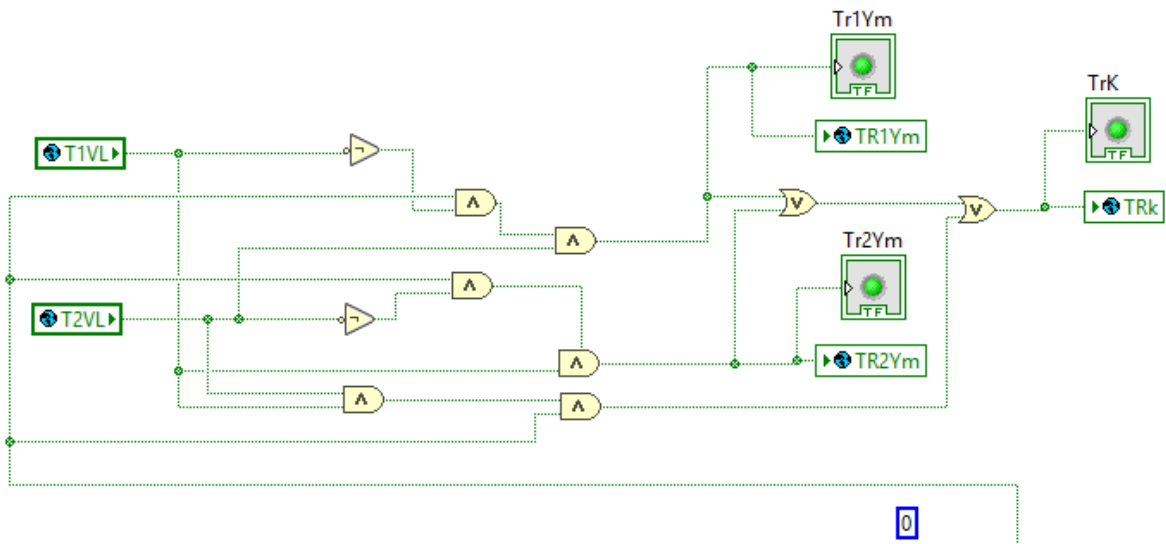
Joonis 4.7. Sisendite töötlus



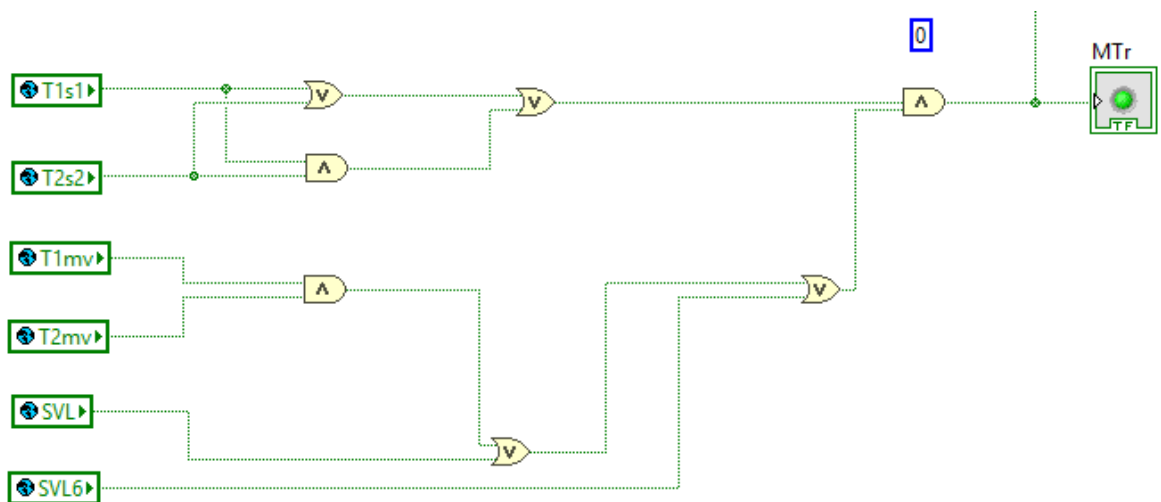
Joonis 4.8. Väljundite edastamine

NI kontrollerist edastatakse väljundid joonisel 4.8 esitatud meetodil. Generaatori ergutusüsteemi saadetakse VAR-kontrollerist tulenev arvuline suurus Ge1VAR ja pingeregulaatorist väljuv Ge1Ureg. Enne lõplikku ülekandmist kombineeritakse mainitud kahest väärtusest ühtne arvvektor, mis liigub seejärel läbi kindla lüli.

Võrgukonfiguratsiooni kohta ehk teavet kahe sektsiooni või trafode 1 ja 2 kokku ühendamisest saab generaatori reaktiivvõimsuse regulaator joonistel 4.9 ja 4.10 esitatud lülitustega. Selles on tähised T1VL ja T2VL vastavalt trafode võimsuslülitelid iseloomustavad olekud. Tr1Ym ja Tr2Ym määravad ära, kas reguleeritakse trafo 1 või 2 primaarpoolel mõõdetava reaktiivvõimsuse järgi. Olek Trk annab teavet trafode kokku ühendamise kohta. Joonisel 4.9 nähtav skeem on ahela 0 kaudu seotud joonisel 4.10 paikneva lülituste kogumiga.



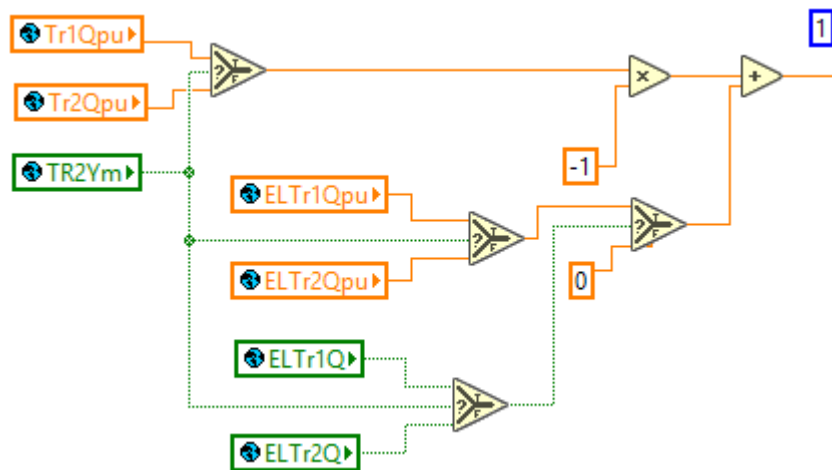
Joonis 4.9. Trafode vahelise ümberlülituse määramine



Joonis 4.10. Sektsioonide kokku ühendamise määraja

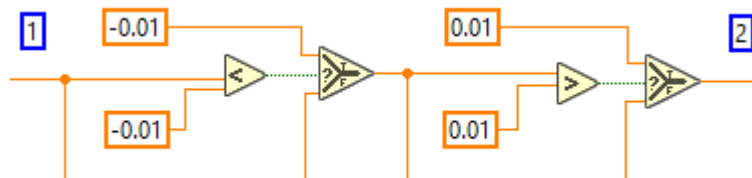
Seega määratakse joonisel 4.10 asetsevate lülidega, kas modelleeritud elektrivõrgu kaks sektsiooni on teatud võimsuslülitite kaudu ühenduses või mitte. Teave sektsioonide ühendamiseks edastatakse olekuga Mtr ning ahela 0 kaudu. Ülejäänud sisendid on võimsuslülitite iseloomustavad olekud. Nõnda tähistab T1s1 Trafo 1 ja sektsioon 1 vahelist, T2s2 Trafo 2 ja sektsioon 2 vahelist, T1mv Trafo 1 ja möödaviiklati vahelist, T2mv Trafo 2 ja möödaviiklati vahelist, SVL Trafode 1 ja 2 vahelist ja SVL6 Sektsioonide 1 ja 2 vahelist võimsuslülitit.

Joonisel 4.11 on nähtav trafode C1T või C2T primaarpoolel mõõdetava reaktiivvõimsuse arvulise suuruse sisendid Tr1Qpu ja Tr2Qpu, mida võrreldakse etteantud sätteväärtustega. Selleks on kas fikseeritud suurus, milleks on käesolevas olukorras null või määratakse ära Elering AS poolt edastatud sisendite ELTr1Qpu ja ELTr2Qpu kaudu. Käsklus ümberlülituseks saabub olekute ELTr1Q ja ELTr2Q aktiivseks muutumisega. Reguleeritavate trafode vahel vahetatakse asendit sisendiga Tr2Ym. Edasiselt liigub kahe võrreldava väärtuse erinevus mööda ahelat 1.



Joonis 4.11. Liitumispunktis reaktiivvõimsuse mõõteväärtuse muutumist järgiva PI-regulaatori sisendid

Joonisel 4.12 on ahela 1 kaudu saabuva teabe läbimine konkreetsetest piirajatest, mis ei luba PI-regulaatorisse edastaval suurusel järsult muutuda. Seejärel väljub arvuline väärtus ahela 2 kaudu.

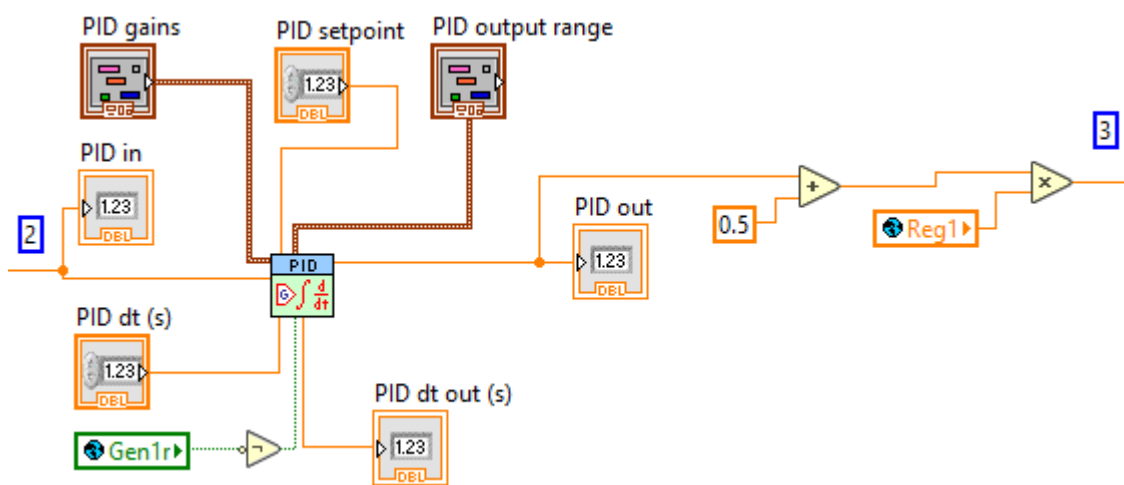


Joonis 4.12. Muutuja väärtuse piiraja

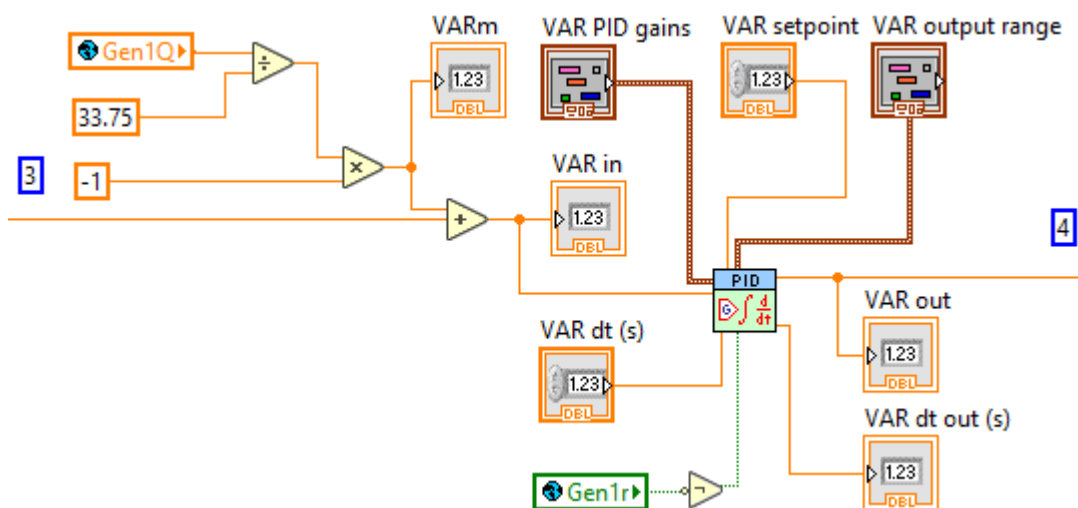
Mainitud ahelast 2 jõuab teave PI-regulaatorisse, mis on esitatud joonisel 4.13. Sellest järgnevalt korrutatakse vastav arvuline suurus osakaalude regulaatorist tuleneva suurusega. Nende tulem

liigub ahelat 3 mööda edasi VAR-kontrollerisse. Sisendit Gen1r kasutatakse PI-regulaatoris paikneva integraatori lähtestamise juures. Säärase tegevuse peamine eesmärk on generaator G1 reaktiivvõimsuse mittejühtimise korral vältida vastava regulaatori summeerivat toimet.

Joonisel 4.13 oleval PI-lülil, mille diferentsiaalkomponent on piiratud, kasutati parameetreid Kc suurusega -0,1 ja Ti suurusega 0,001. Tegemist on LabView keskkonnas rakendavate arvuliste väärtustega, nagu ka edaspidises aruande punktides esile tõstetavad, ja need tuleb teistes arvutusprogrammides asendada sobivatega, et tagada üldise regulaatori stabiilne toimimine. Vastava lüli väljund fikseeriti vahemikuga -0,1 kuni 0,15. PI-regulaatorist väljuv arvuline suurus kantakse ahela 3 mööda VAR-kontrollerisse, mis on joonistel 4.14 ja 4.15.



Joonis 4.13. Liitumispunktis reaktiivvõimsuse mõõteväärtuse muutumist järgiv PI-regulaator

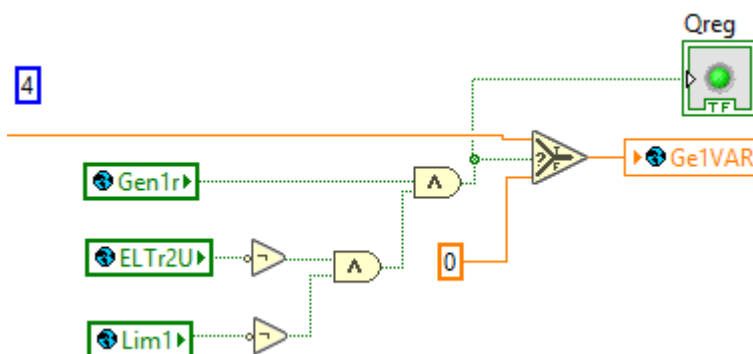


Joonis 4.14. Generaatori G1 VAR-kontroller

Enne regulaatorit võrreldakse saabuvat väärtust generaatori G1 klemmidelt mõõdetava reaktiivvõimsusega. Siinkohal kasutatakse samamoodi sisendit Gen1r regulaatoris paikneva

integraatori lähtestamisel. Generaator G1 ergutule määratud parameeter liigub ahelat 4 kaudu väljundisse Ge1VAR, mida ilmestab joonis 4.15. VAR-kontrolleris asetseva PI-lüli parameetrid olid K_c suurusega -0,1 ja T_i suurusega 0,1. Selle väljund fikseeriti vahemikuga -0,1 kuni 0,3.

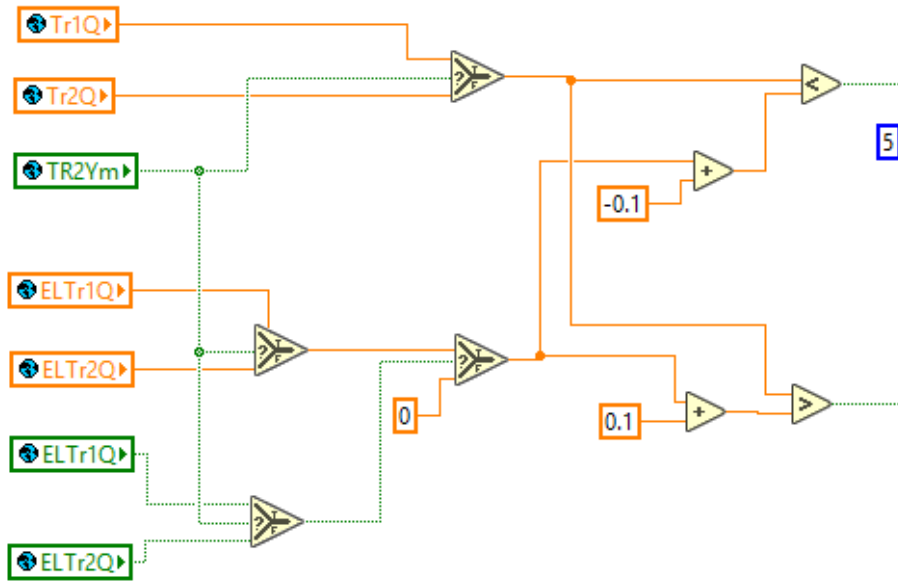
Enne generaator G1 ergutule käskluse andmist ehk reguleerväärtuse edastamist peavad ahela 4 kaudu jõudvale teabele olema lubatav olek Gen1r ja ei tohi olla aktiivsed olekud ELTr2U ning Lim1. Esimene nendest tähendab pingereguleerimist ja teine lisapiirangut, milleks võivad näitena olla teatud kontrollmõõtmised teistes elektri ahela punktides. Sedamööda osutub võimalikuks määrata, kas kontrollerisse sisenevad arvulised suurused jäävad õigetesse vahemikkesse. Juhul, kui see ei ole nii, saab olekute Lim1....4 kaudu peatada regulaatori toimingud.



Joonis 4.15. Generaatori G1 VAR-kontrolleri väljund

Stabiilse reguleerimiskiiruse saavutamiseks kasutatakse osakaalude regulaatori nimetust kandvat lülide kogumit, mis on toodud esile joonistel 4.16....4.18. Põhimõtteliselt korrutatakse sellest väljuva tulemiga PI-regulaatoris saabuvalt arvulist väärtust. Ennekõike on osakaalude regulaatori eesmärk fikseerida generaatori poolt toodetav reaktiivvõimsuse sätteväärtus ja muuta see vähesõltuvaks PI-regulaatori muutustele. Üldjoontes osutub säärane lahendus oluliseks olukordades, milles juhitakse ühtselt mitmete generaatorite ergutussüsteeme.

Vastavasse lülide kompleksi saabuvad mõõteväärtustega sisendid Tr1Q ja Tr2Q ning Elering AS poolt etteantud sättesuurused ELTr1Q ja ELTr2Q. Samuti trafode C1T ja C2T vahel ümberlülitust iseloomustav TR2Ym ning Elering AS edastavale sätteväärtusele üle minemise lülituskäsklust kandvad ELTr1Q ja ELTr2Q. Muuhulgas on seatud mittereguleeritavaks vahemikuks 0,1 Mvar hoitava reaktiivvõimsuse arvulisest väärtusest, mida on võimalik vajadusel laiendada või kitsendada. Mainitud vahemikus reguleerib generaatori ergutit ehk põhimõtteliselt VAR-kontrolleri sättesuurust ainult PI-regulaator. Kirjeldatud lülide kogum jätkub joonisel 4.17 ahelatega 5.

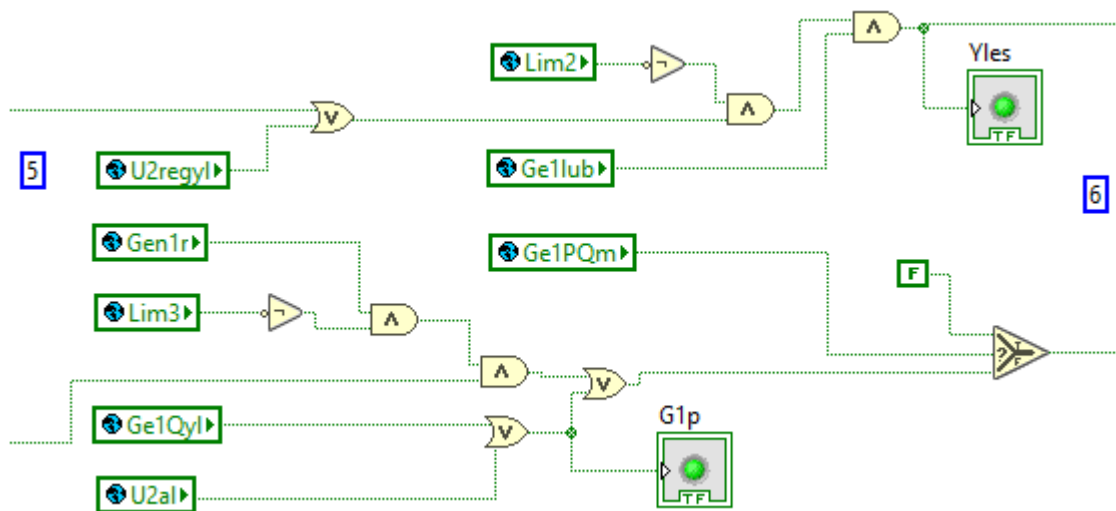


Joonis 4.16. Generaatori G1 reaktiivvõimsuse osakaalu regulaatori ehk fiksaatori sisendid

Joonisel 4.17 nähtavad lülitused ehk olekud on vajalikud generaatori reaktiivvõimsuse tõstmise või langetamise juhtimiseks. Esmaselt on oluline, et reguleeritava generaatori reaktiivvõimsuse suurendamine on üleüldse lubatud sisendiga Ge1Lub. Samuti on vajalik täiendavate piirangute puudumine olekuga Lim2. Sisend U2Regyl omab võimekust eelpool nimetatud kahe oleku sobivas asendis olemise korral suurendada generaatori reaktiivvõimsust ka olukorras, milles ahela 5 kaudu säärast käsklust ei saabu. Seda on ennekõike vaja situatsioonis, milles generaatori latipinge on alla lubatud minimaalset piirväärtust.

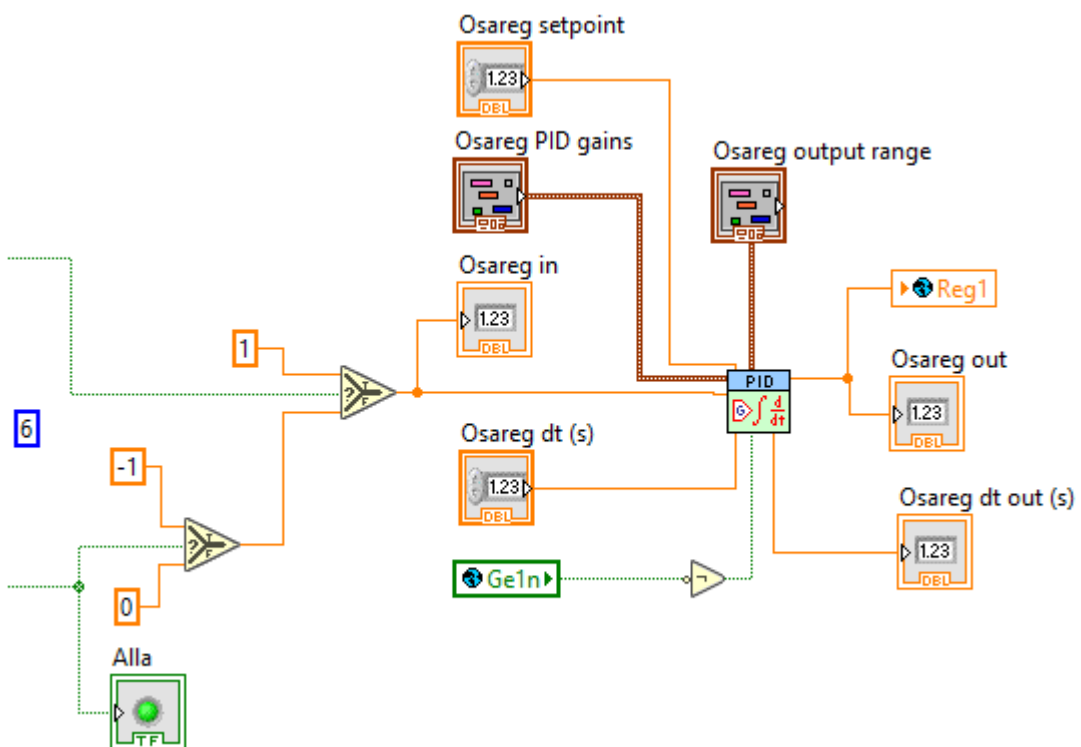
Sisend Ge1PQm peatab reguleeritava generaatori reaktiivvõimsuse vähendamise juhul, kui see läheneb seadmele lubatud minimaalse reaktiivvõimsuse väärtusele. Olekud Gen1r ja Lim3 on vajalikud generaatori toodetava reaktiivvõimsuse üldise langetamise lubamiseks. Nendest esimene tähendab, et seadme VAR-regulaatori juhtimine on aktiveeritud ja teine ilmestab täiendavaid piiranguid, mis võivad näitena olla teatud mõõtetulemuste häiringud.

Olekud Ge1Qyl ja U2al langetavad samamoodi generaatori reaktiivvõimsust olukorras, milles see läheneb või ületab teatud piiranguid. Esimene hoiab toodetavat lubatava reaktiivvõimsuse ülempiiri juures ja on ennekõike vajalik olukorras, milles toimub mitme generaatori ergutussüsteemide juhtimine. Teine vähendab genereeritavat reaktiivvõimsust juhul, kui selle latipinge ületab kõrgemat lubatavat arvulist suurust. Siinkohal ei sõltu viimase kahe sisendi toime ahela 5 kaudu saabuvatest käsklustest. Samas, olek Ge1PQm piirab lõplikult seadme reaktiivvõimsuse vähendamise. Kokkuvõtlikult liiguvad lubatud reguleerimisväljundid ahelaid 6 mööda edasi.



Joonis 4.17. Generaatori G1 reaktiivvõimsuse osakaalu regulaatori ehk fiksaatori loogikalülitused

Edasisel joonisel 4.18 on esitatud osakaalude regulaatoris asetsev PI-lülitus koos sisenevate ahelatega 6.



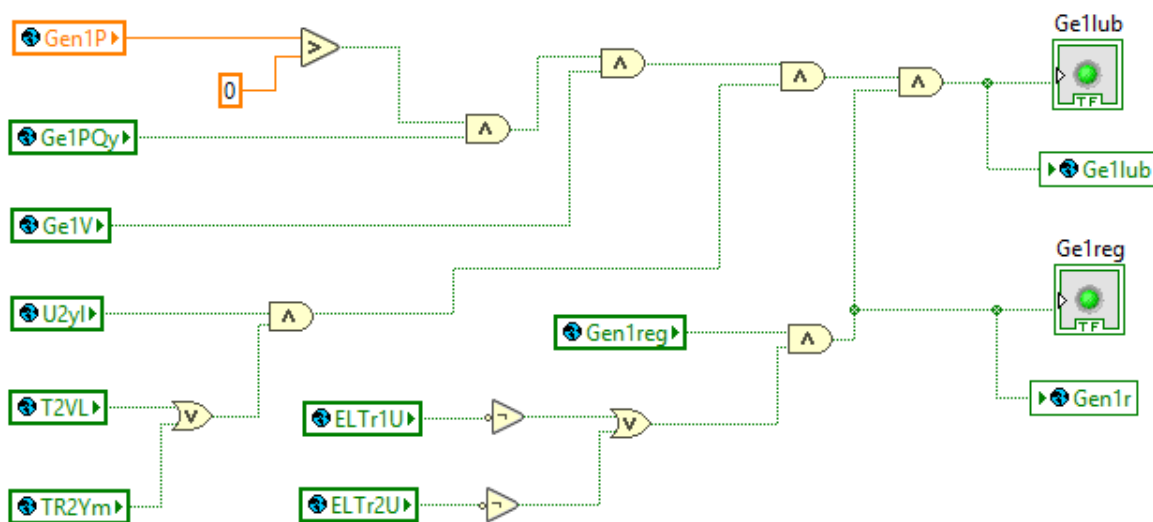
Joonis 4.18. Generaatori G1 reaktiivvõimsuse osakaalu regulaatori ehk fiksaatori väljund

Olekuga Ge1n saab vajadusel lähtestada mainitud lülis asetsev integraator. Säärane võimalus osutub vajalikuks jällegi olukorras, milles juhitakse mitme generaatori reaktiivvõimsust ja soovitakse vältida situatsioonis, milles üks generaator toodab reaktiivvõimsust ja teine hakkab seda tarbima. Nõnda piiratakse nähtava PI-lülituse toime, kui näitena reguleeritav generaator hakkab genereerima negatiivset reaktiivvõimsust. Käesolevalt otseselt sisendit Ge1n ei kasutata, kuid

sellele võib omistada teistsuguseid eesmärgi. PI-lülis väljuv arvuline suurus edastatakse Reg1 muutuja kaudu ja korrutatakse joonisel 4.13 nähtava PI-regulaatorist saabuva arvulise suurusega. Osaregulaatoris paikneva PI-lüli parameetritena kasutatud Kc oli suurusega -0,001 ja Ti suurusega 0,001. Selle väljund fikseeriti vahemikuga -0,5 kuni 1,0.

Selleks, et oleks võimalik generaator G1 reaktiivvõimsust juhtida ja seda suurendada, on vajalik oleku Ge1Lub sobiv asend, mis omakorda sõltub mitmetest teistest parameetritest ja on vaadeldav joonisel 4.19. Nõnda peab reguleeritav generaator tootma aktiivvõimsust, mida kontrollitakse sisendiga Gen1P. Samuti on vajalik oleku Ge1PQy positiivne väärtus iseloomustades seadme genereeritava reaktiivvõimsuse jäämist alla lubatud ülempiiri. Juhul, kui see ületatakse, peatatakse ka reaktiivvõimsuse suurendamine.

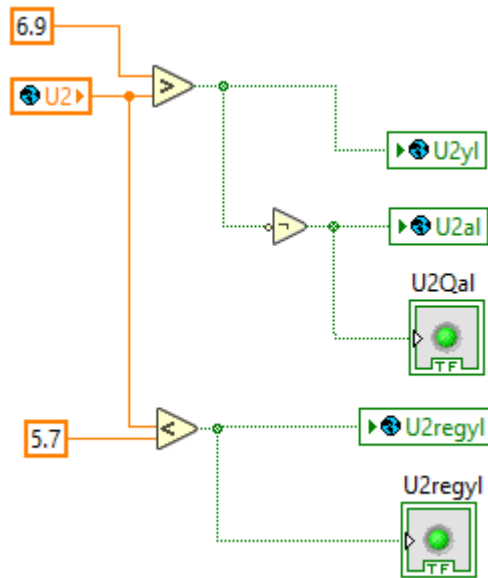
Muuhulgas on veel vajalik, et generaator G1 oleks võimsuslüliti vahendusel elektrivõrguga ühendatud ja seda märgistab sisend G1V. Lisaks peab generaatori latipinge jääma alla kõrgema lubatava väärtuse, mida näitab olek U2al. Täiendavalt on oluline, et ka trafo C2T oleks elektrivõrguga ühendatud või toimub regulaatori ümberlülitus trafo C1T sisendile. Viimati mainitud kahte olekut kirjeldavad tähised T2VL ja TR2Ym. Samuti on vajalik generaatori reguleerimise lubamine olekuga Gen1reg. Lisaks eelnevale piiratakse generaatori G1 reaktiivvõimsuse juhtimissüsteemi teatud lülitused nagu VAR-kontrolleri väljund olukorras, milles Elering AS edastab pingereguleerimise käsklused.



Joonis 4.19. Reaktiivvõimsuse reguleerimist määravad lülitused

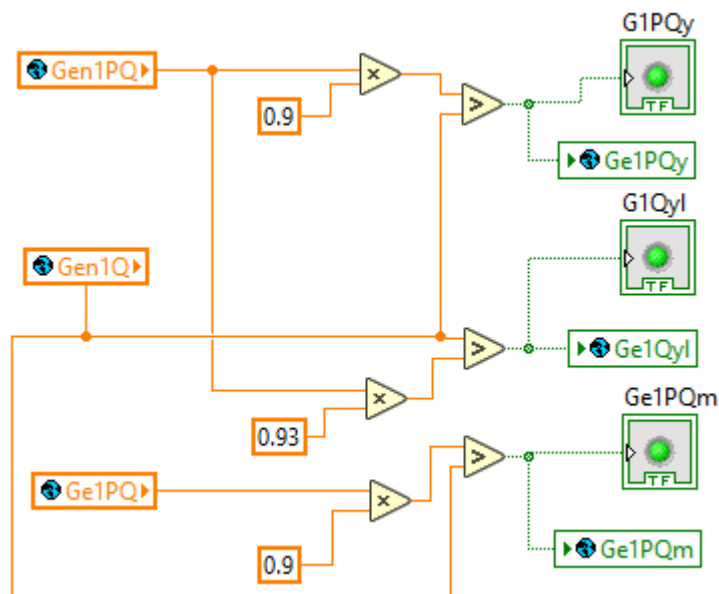
Joonisel 4.20 on esitatud lülitused määramaks ära generaatori G1 latipinge jäämise lubatud vahemikku. Sisendina kasutatakse suurust U2 ja väljundid U2yl, U2al ning U2regyl. Esimene nendest väljunditest näitab, kas pinge on alla maksimaalse lubatud väärtuse. Teine annab käskluse juhitava generaatori reaktiivvõimsuse vähendamiseks, kui on ületatud mainitud pingepiir. Viimane edastab

teabe latipinge mõõdetava suuruse olemisest alla lubatava minimaalse piirväärtuse ning seetõttu tõstetakse teiste vajaminevate olekute sobivuse korral generaatori reaktiivvõimsust.



Joonis 4.20. Generaatori G1 latipinge piirväärtuste määrajad

Generaatori poolt toodetava reaktiivvõimsuse tõstmise või langetamise võimalikkus määratakse ära joonisel 4.21 esile toodud lülitustega.

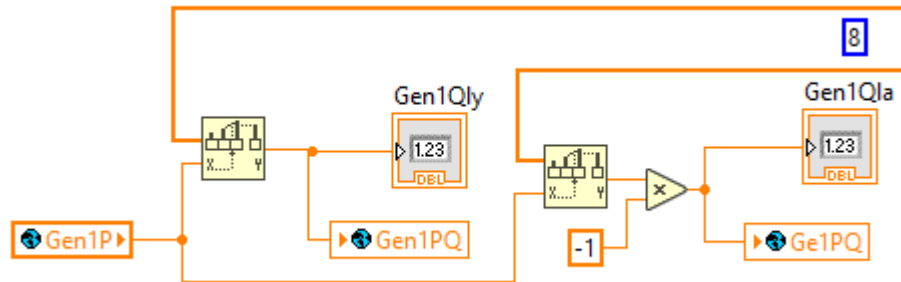


Joonis 4.21. Generaatori G1 reaktiivvõimsuse piirajad

Sisenditena kasutatakse võrreldavat seadme reaktiivvõimsust iseloomustavat suurust Gen1Q, lubatud reaktiivvõimsuse maksimaalset ülempiiri tähistavat Gen1PQ ja lubatud reaktiivvõimsuse minimaalset alampiiri näitavat Ge1PQ. Vastavast lülide kogumist saadetakse välja teave genereeritava reaktiivvõimsuse jäämisest alla lubatud ülempiiri olekuga Ge1PQy. Samuti hoitakse

oleku Ge1Qyl rakendamisel teiste juhitavate generaatorite korral seadme toodetavat reaktiivvõimsust väheste muutumiste juures. Väljundiga Ge1PQm piiratakse generaatori reaktiivvõimsuse vähendamine. Joonisel 4.21 nähtavate arvvärtuste valikul on soovitud vältida seadme tööpunkti jõudmist lubatud genereeritava reaktiivvõimsuse piirväärtuste juurde.

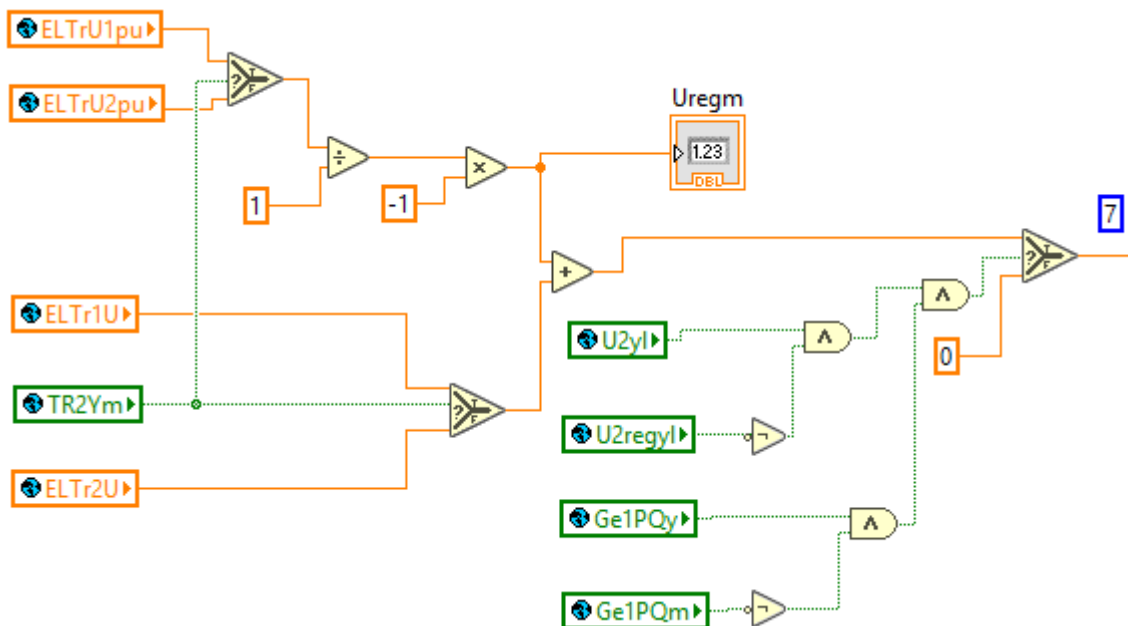
Eelpool mainitud reaktiivvõimsuse piirsuurused seadistatakse joonisel 4.22 esitatud lülidega.



Joonis 4.22. Generaatori G1 PQ-kõvera arvestamine

Sisendina kasutatakse generaatori aktiivvõimsust ilmestavat mõõteteavet Gen1P. Väljunditena on rakendatud seadmele lubatud reaktiivvõimsuse maksimaalset ülempiiri tähistav Gen1PQ ja lubatud reaktiivvõimsuse minimaalset alampiiri näitav Ge1PQ. Ahelaga 8 võetakse generaatori PQ-kõverat iseloomustavad suurused vastavatest vektoritest.

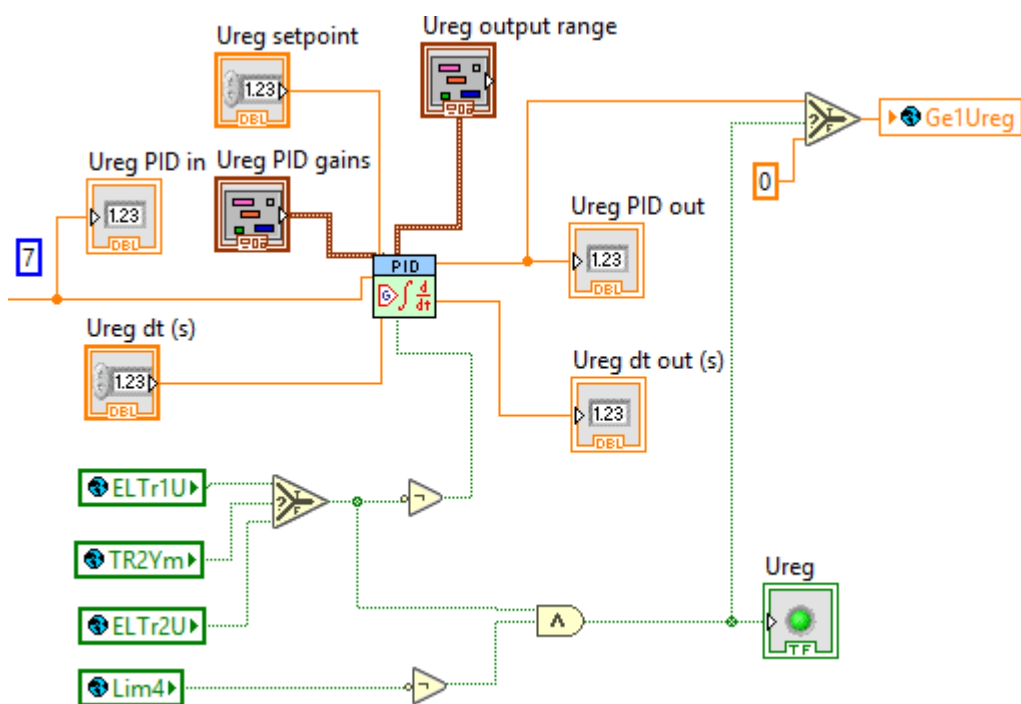
Olukorras, milles on vajalik hoida trafo C1T või C2T primaarpoolel Elering AS poolt kindlaks määratud reaktiivvõimsuse sätteväärtuseid, kasutatakse joonistel 4.11 ja 4.16 nähtavaid lülitusi. Siinkohal pinge reguleerimise jaoks konstrueeritud lahendus on esitatud joonisel 4.23.



Joonis 4.23. Pingeregulaatori sisendid

Mõõteväärtuseid ja sättesuureid saadakse sisenditega ELTrU1pu ja ELTrU2pu ning ELTr1U ja ELTr2U. Kahe trafo primaarpoolelt edastatavate väärtuste vahel lülitatakse ümber olekuga TR2Ym. Sisendid U2yl, U2regyl, Ge1PQy ja Ge1PQm on vajalikud hoidmaks generaatorit G1 lubatud reaktiivvõimsuse tootlikkuse ja latipinge piirides. Ahela 7 kaudu liigub arvuline suurus edasi joonisel 4.24 esitatud osasse.

Elering AS poolt etteantud pingeväärtuse järgi reguleerimise jaoks kasutatakse joonisel 4.24 nähtavat PI-regulaatorit. Sellesse saabuva ahela 7 mööda jõuab arvuline suurus mainitud lülisse, mille väljund jõuab muutuja Ge1Ureg näol generaatori ergutussüsteemi. ELTr1U, ELTr2U, TR2Ym ja Lim4 on vajalikud pingeregulaatori sisse ja välja lülitamiseks. Samuti piiravad need olekud integraatori toimimise mittereguleeritavas olukorras. Pingeregulaatoris asetseva PI-lüli parameetrid olid Kc suurusega -0,01 ja Ti suurusega 0,001. Selle väljund fikseeriti vahemikuga -0,1 kuni 0,1.

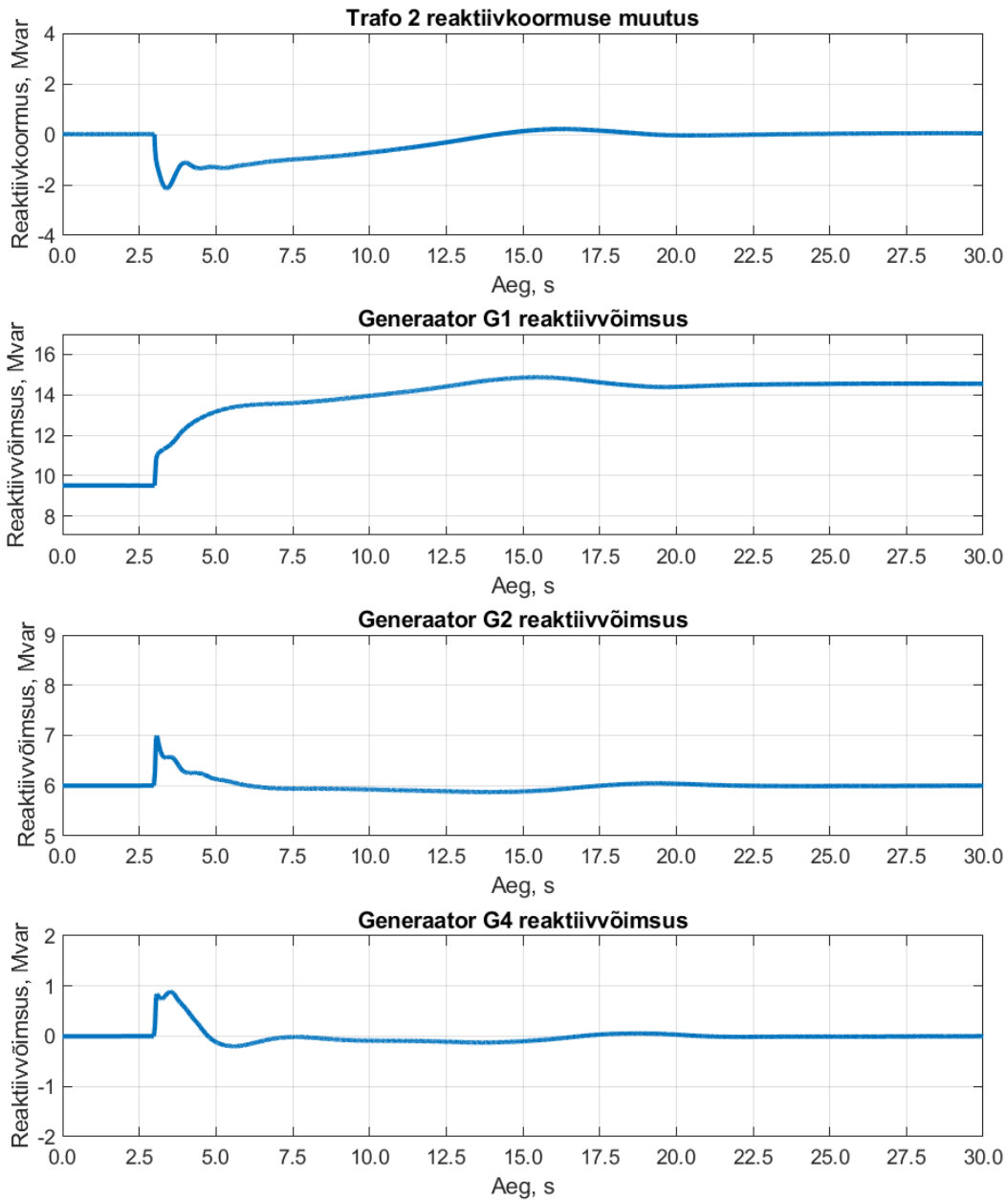


Joonis 4.24. Pingeregulaator koos väljundiga

4.4 Kontrolleri rakendamise tulemused

Edasiselt on välja toodud olulisemad graafikud, mis iseloomustavad konstrueeritud juhtimisloogika kasutamisel peaesmärgi saavutamist ehk trafo C2T või vajadusel C1T primaarpoolel mõõdetava reaktiivvõimsuse minimeerimist. Siinkohal vaadeldakse situatsiooni, milles alusena võetava elektrijaama kaks sektsiooni 1S ja 2S on lahus. Joonisel 4.25 on näha elektrijaama sisemise

reaktiivvõimsuse tarbimise suurenemise viie Mvar võrra korral liitumispunktist läbi mineva reaktiivvõimsuse hoidmine väärtuse null ligidal.

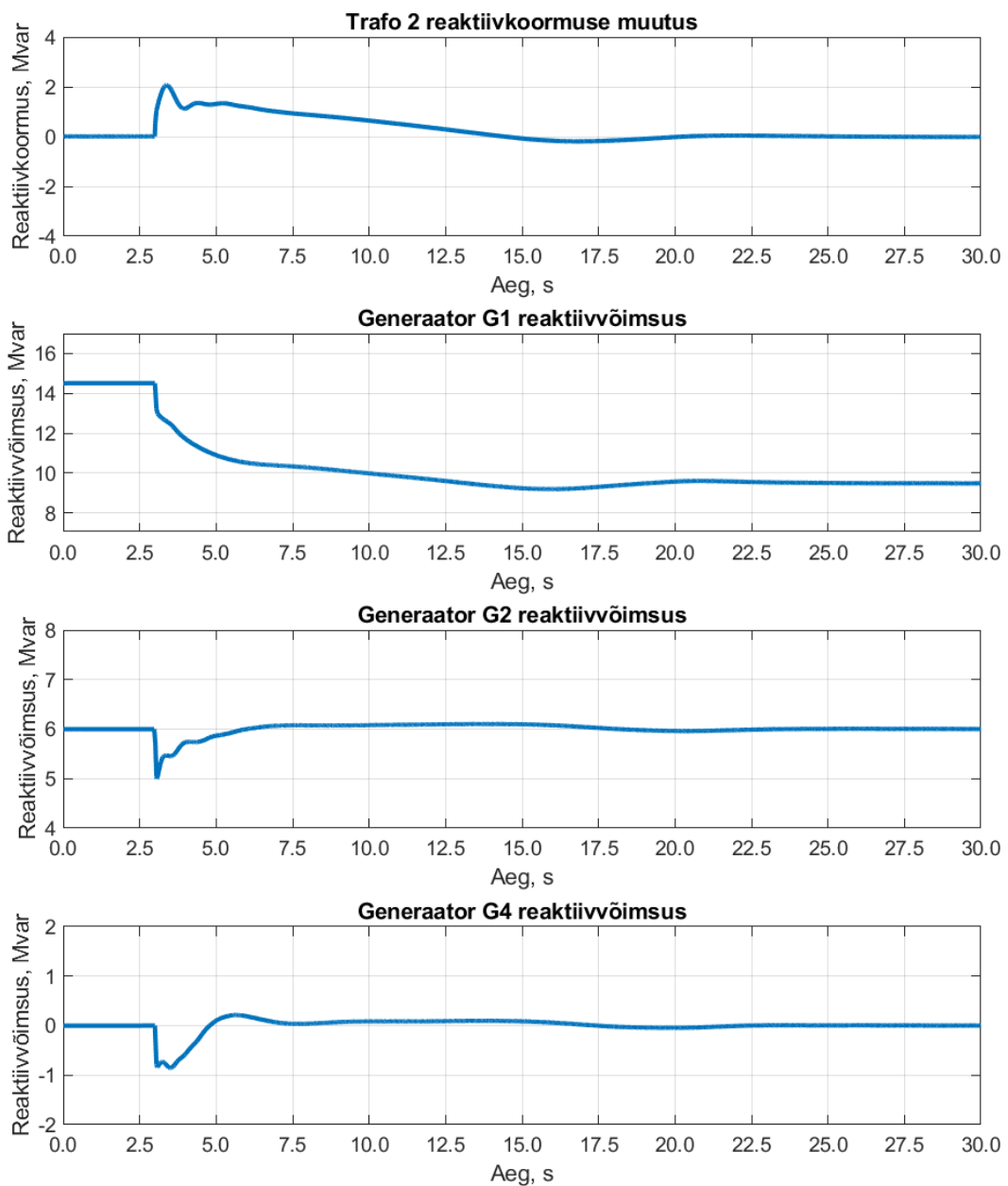


Joonis 4.25. Liitumispunktis mõõdetava reaktiivvõimsuse minimeerimine koormuse kasvul 5 Mvar võrra

Ühtlasi selgub, et reaktiivvõimsuse puudujäägi kõrvaldas generaator G1 ajavahemikus 3 kuni 14 s. Sama sektsiooni 2S külge ühenduvate generaatorite G2 ja G4 reaktiivvõimsuse kogused ei muutunud ning nende väljundid stabiliseerusid reguleerimise lõppedes. Seda välja arvatud reguleerimise alguses, milles generaatorite eneste ergutusüsteemid üritasid tasakaalustada teineteist ja hoida pinge suurust normide piires. Muuhulgas nähtub VAR-regulaatori ja kontrolleri loogika rakendamisel küllaltki suur generaator G1 ergutusüsteemi omatoime nii reguleerimise alguses, suhteliselt järsu reaktiivvõimsuse tõusuna, kui ka teatud ülevõnkumise tekkimisel

ajavahemikus 14 kuni 18 s. Teoreetiliselt saab neid vähendada täpsemate, sealhulgas isegi ergutussüsteemi sisemiste, parameetrite seadistamisega. Tegelikult erines generaator G1 oma reageeringutes teistest neljast generaatorist ning kokkuvõttes muudab säärane kõrvalekalle üldise juhtimissüsteemi lõpliku seadistamise keerukamaks. Muuhulgas on vajalik ka täiendada, et reaktiivenergia kogus sõltub pinge väärtustest ning veel hajuvustes ühendustes paiknevates reaktorites ja teistes induktiivsetes elementides. Seetõttu ei kajastu ühe generaatori reaktiivvõimsuse muutus otseselt mõõtepunkti registreeritud suurustes.

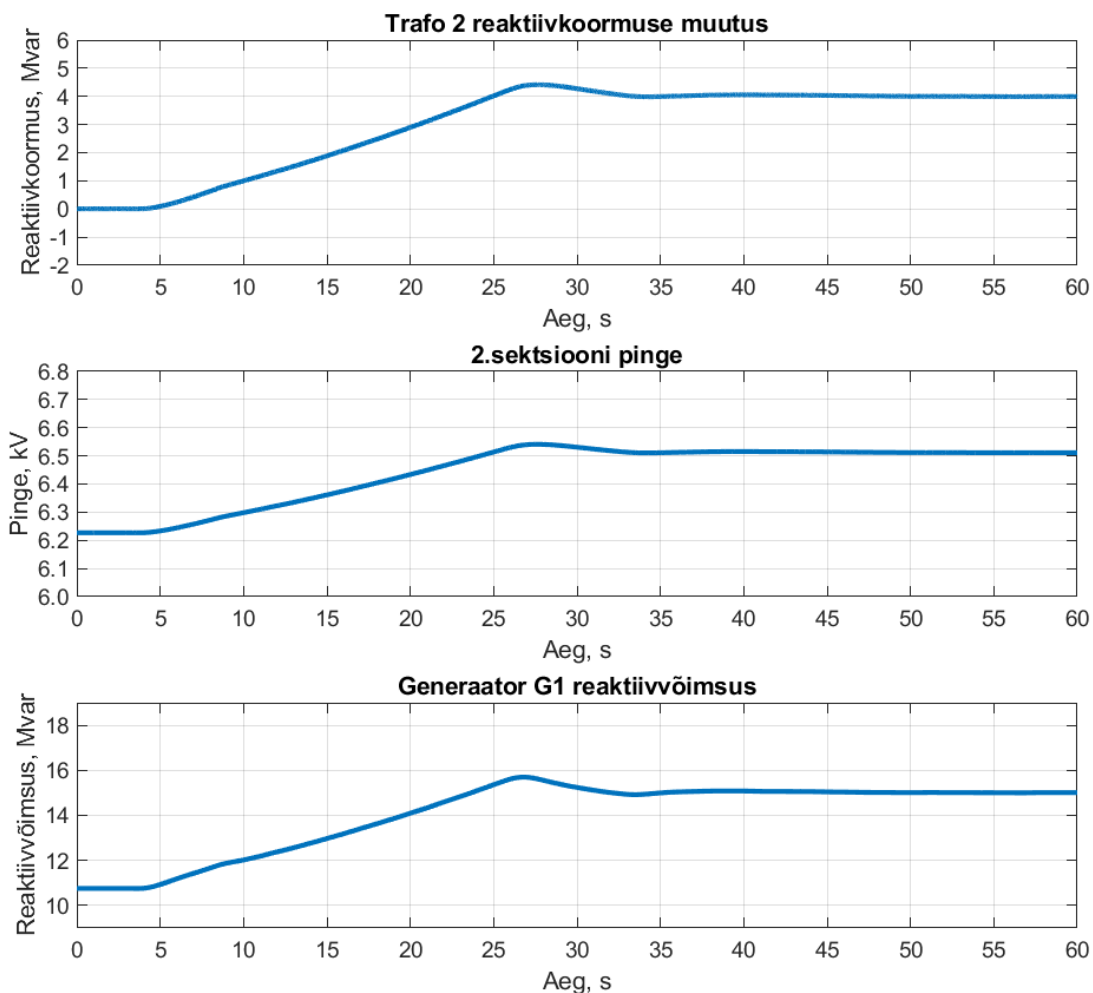
Järgneval joonisel 4.26 on üldjoontes samalaadne olukord, mida eelnevalt kirjeldati. Siinkohal langeb aga elektri jaama sisemiste tarbijate poolt nõutav reaktiivvõimsus viie Mvar ulatuses.



Joonis 4.26. Liitumispunktis mõõdetava reaktiivvõimsuse minimeerimine koormuse langedes 5 Mvar võrra

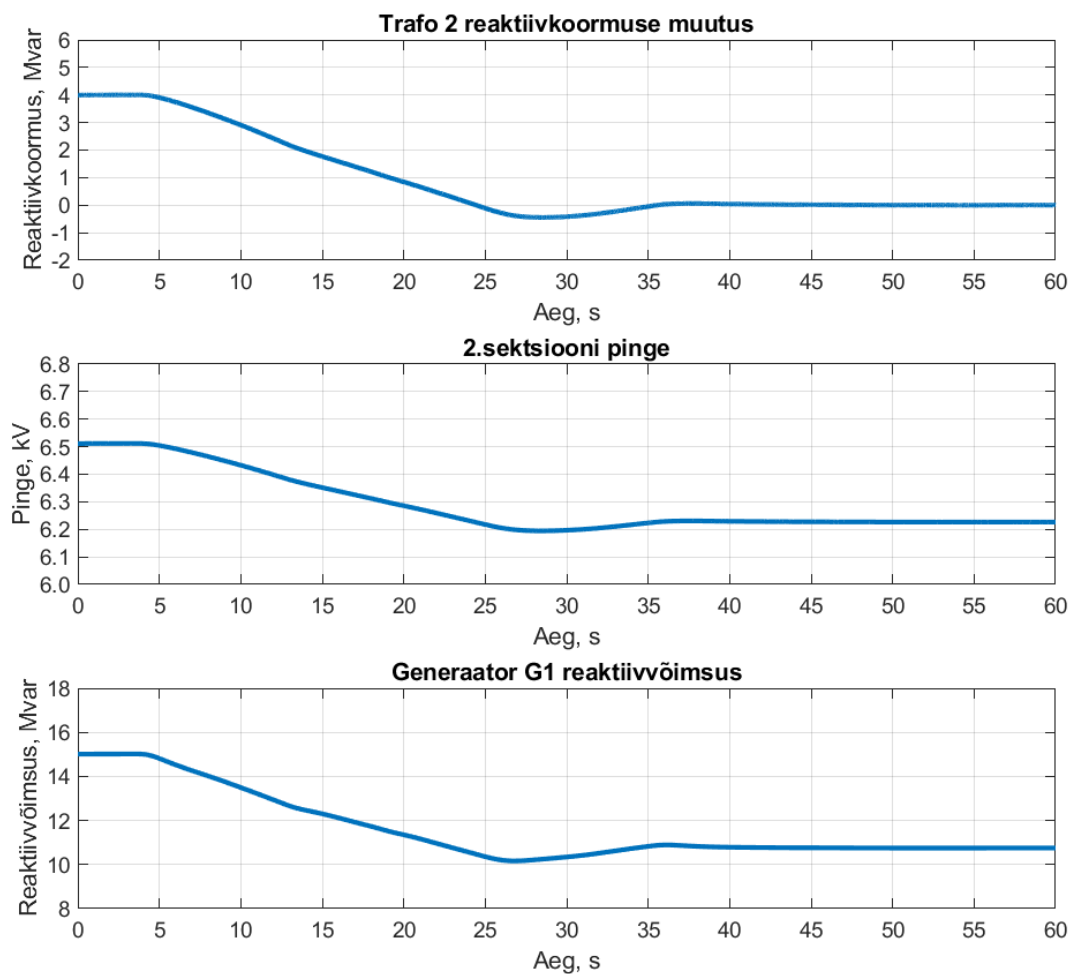
Jällegi osaleb reaktiivvõimsuse reguleerimises ehk juhtimises ainult generaator G1. Ülejäänud sama sektsiooni küljes olevad generaatorid peavad säilitama reaktiivvõimsuse mittemuutmise. Graafikutelt on jälgitav ühtlane reaktiivvõimsuse vähenemine trafo C2T primaarpoolel asetsevas liitumispunktis ajavahemikus 3,5 kuni 15 s. Teistpidi alaneb reguleerimise alguses juba eelpool mainitud põhjusel generaator G1 reaktiivvõimsus kiiremini ning aeglustub üldise juhtimissüsteemi toimimise rakendumisel. Peaesmärgi saavutamisel ilmneb samamoodi teatud ülevõnge, mille vältimine ilma ergutusüsteemi muutmata on raskendatud.

Edasistel joonistel 4.27 ja 4.28 on esitatud olukorrad, milles põhivõrgu haldaja Elering AS muudab liitumispunktis elektrijaama poolt seadistatud sätteväärtuseid ehk vastavalt tõstab või langetab seda nelja Mvar võrra. Siinkohal ei ole tegemist reaktiivkoormuse järsu muutusega ja seetõttu on vaadeldav paremini VAR- ja sellele eelneva PI-regulaatori toimimine. Mõlema situatsiooni korral on saavutatud ühtne reguleerimiskiirus.



Joonis 4.27. Liitumispunktis mõõdetava reaktiivvõimsuse muutus sättesuuruse tõstmisel 4 Mvar võrra

Nõnda hakkab kohe peale sätevärtuse muutumist üldine juhtimissüsteemi toimima ja tõstab generaatori G1 poolt toodetava reaktiivvõimsuse joonisel 4.27 ajavahemikus 4,5 kuni 25 s vajalikule tasemele. Kuna tegemist on suhteliselt suure omatoimeajaga ja sisendväärtustele algselt küllaltki kiire ning hiljem aeglasema generaator G1 ergutussüsteemi reageeringuga, sõltudes sisemiste PI- ja PID-lülide parameetritest ning omavahelisest järjestusest, ilmneb tekkiv ülevõnge ajavahemikus 25 kuni 32 s. Reaktiivvõimsuse sätevärtuse vähendamisel toimub generaator G1 reaktiivvõimsuse alanemine joonisel 4.28 ajaperioodis 4,5 kuni 25 s, millele järgneb vastava seadme põhjustatud ülevõnge vahemikus 25 kuni 35 s.



Joonis 4.28. Liitumispunktis mõõdetava reaktiivvõimsuse muutus sätesuuruse alandamisel 4 Mvar võrra

Kokkuvõtlikult iseloomustavad eelnevad joonised 4.25...4.28 tööstuskontrolleriga ühe generaatori ehk G1 reguleerimisel ootuspäraseid resultate. Teatud aspektid, nagu ergutussüsteemide mõju vähendamine, vajavad veel tähelepanu ja täpsustamist, kuid need ei muuda üldise reaktiivvõimsuste regulaatorite juhtimissüsteemi põhimõtet ega struktuuri. Samuti on eeldatav, et mitme generaatori üheaegsel reguleerimisel saavutatakse sarnased sobilikud tulemused.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö raames vaadeldi võimalust, kuidas põhivõrguga seonduvas liitumispunktis saavutada reaktiivenergia edastamise või vastuvõtmise minimeerimine kasutades kohapealseid ehk elektriijaama või tööstusobjekti sisemisi reaktiivvõimsust genereerivaid elemente nagu sünkroongeneraatorid. Põhimõtteliselt eeldab säärane tegevus veel nendes asetsevate reaktiivvõimsust vajavate tarbijate olemasolu. Resulteeruvalt alaneksid sealjuures vastava ettevõtte tegevuskulud ja objekti raames asetsevate teatud ühenduste aktiiv- ja reaktiivvõimsuskaod.

Sellest eesmärgist tulenevalt konstrueeriti ühte reaalselt VKG OÜ omanduses olevat elektriijaama lähtealusena võttes mitme generaatori reaktiivvõimsuse juhtimissüsteem rakendades selleks reaallaja simulaatorit ehk RTDSi. Viimast peetakse asendamatuks vahendiks piisavalt täpsete elektrivõrgu simulatsioonide saamise juures. Siinkohal tugineti omakorda veel erinevatele meetoditele, millele põhinedes osutub mõistlikuks mitme generaatori vahel reaktiivvõimsust jagada. Nendest peamistena saab esile tõsta võrdelise, proportsionaalse ja mõõtetulemustele tugineva meetodi. Mainitustest kõigil on omad eelised ja puudujäägid ning seda käsitleti pikemalt magistritöö peatükis 2. Samuti analüüsiti lahendusi, kuidas ning milliseid elemente nagu PI- ja loogikalülisid kasutades on võimalik saavutada peaeesmärgina sätestatud liitumispunktist läbimineva reaktiivvõimsuse vähendamine. Tulenevalt eelnevast toodi välja paar seda teha lubavate reaktiivvõimsuste regulaatorite ülesehitust ning selgitati nende erinevuste olemust.

Seejärel töötati RTDSis välja juba mitme generaatori reaktiivvõimsuste reguleerimise juhtimissüsteem, mis suudaks arendustegevuse eesmärgil erinevate generaatorite vahel reaktiivvõimsuste jaotamise meetodeid rakendada. Lisaks pidi säärase reguleerimiste tulemusena vähenema liitumispunktis mõõdetav reaktiivvõimsuse kogus. Muuhulgas tõsteti esile vajaminevad sisendid, mille kaudu saabub vajalik teave üldisse regulaatorite juhtimissüsteemi ning annaks sealjuures viimasele teavet elektrivõrgus toimuva kohta. Mainitu on äärmiselt oluline täpsete reguleerimiste juures ning generaatorite reaktiivvõimsuste ja jaotlate latipingete hoidmisel lubatavates piirväärtuste vahemikes.

Ennekõike tähendas reaallaja simulaatori kasutamine reaalselt elektriijaama iseloomustava ligilähedase keskkonna loomist. Teisest küljest ei võtnud see otseselt arvesse tööstuskontrolleri, millel kogu juhtimissüsteem asetseb, omatoimeaega ja riist- ning tarkvaralisi piiranguid. Nõnda osutus vajalikuks kontrollida konstrueeritud ning sealjuures ainult programmipõhist lahendust tegelikkesse elektriijaamadesse või muudesse tööstusobjektidesse paigaldavate tööstuskontrolleritega. Seda tehti kasutades NI tööstuskontrollerit, kuid siinkohal ainult ühe

generaatori reaktiivvõimsust reguleerides, kusjuures võttes eeldusena, et sääraselt on võimalik kindlaks teha sätestatud eesmärkide täitmine. Samas, tööstuskontrolleri LabView programmipõhine ülesehitus põhines RSCADil, mille kaudu toimus reaalaaja simulaatori kasutamine. Täiendavalt tuleb vaid aktiveerida mitme generaatori erinevusi arvesse võtvad lülid kogumid.

Kokkuvõtvad tulemused graafikute kujul ilmestasid peaesmärgi saavutamist, milleks oli põhivõrgu ja elektriijaama vahelises liitumispunktis mõõdetava reaktiivvõimsuse vahetuse minimeerimine, mõlemat eelpool kirjeldatud lahendust ehk seadet kasutades. Siinkohal tasub mainida, et väga palju sõltub ikkagi erinevates regulaatoris kasutatavate parameetrite seadistamisest. Nõnda on võimalik suurendada või vähendada reguleerimiskiirust ning tundlikkust elektrisüsteemis toimuvatele protsessidele. Käesoleval juhul jäeti vastavad määratlused säärasteks, mis efektiivselt võimaldavad soovitud saavutada, kuid arusaadavalt saab nende täpsemal muutmisel tõsta veelgi kindlaid reguleerimise reageerimist määravaid näitajaid teatud väärtuse juurde nagu näitena liitumispunktis mõõdetava reaktiivvõimsuse muutumise kiirus. Muuhulgas on vajalik reaalses elektriijaamas tõenäoliselt need lähtuval kohapealsetele tingimustele ümber seadistada.

Sedamööda näitavad ning tõestavad peatükkide 3 ja 4 lõpus asetsevad graafikud kirjeldatud juhtimissüsteemi ülesehituse toimist ja rakendatud meetoodika paikapidavust. Nendelt on vaadeldavad koormuse muutumise tagajärjel tekkivale reaktiivvõimsuse üle- või puudujäägile reageering ning trafode primaarpoolel mõõdetava reaktiivvõimsuse koguse väga madalal hoidmine. Muuhulgas nähtub, et ülejäänud generaatorid, mis ei osalenud reaktiivvõimsuse muutmisel, säilitavad olemasoleva reaktiivvõimsuse genereerimise taseme või muutuvad vastavalt juhtimissüsteemi käsklustele.

Eriti ilmekad on peatüki 4 lõpus olevad graafikud, mis kujutavad üldise regulaatori sätteväärtuste muutumist. Kuna nendel puuduvad järsud koormuse muutused, saab kõige paremini vaadelda regulaatori rakendumist. Tavapärasel koormuse tõusul või langusel reageerivad esmaselt generaatorite ergutussüsteemid ja seetõttu konstrueeritud regulaatorid ei oma reguleerimise alguses sujuvust. Viimane saabub teatud ajalise viivitusega, mida ei saa välistada. Mõistetavalt esitati mainitud peatükkides ainult mõned joonised, kuid samas olid nende näol tegemist resultaati hästi iseloomustavate graafikutega ning ülejäänud sisaldaksid samasugust tulemust, ainult erinevate generaatorite ja nende võimsuste kombinatsioonidega.

Teistlaadne olukord on aga mitme generaatori vahel reaktiivvõimsuse jagamise meetoditega. Peatükis 3.5 selgus, et väga suurt aktiivvõimsuskadude vähendamist erinevate versioonide vahel valides käesoleva näiteelektriijaama korral ei saavutata. Nõnda võib jätta kõrvale keerukam ühendusliinide marginaalkulude järgi võrdlemine ning kasutada mõnda lihtsamat lahendust. Samas

tasub sealjuures ikkagi vältida generaatorite toimimist lubatavate reaktiivvõimsuste ülempiiride läheduses. Siinkohal on jällegi mitme generaatori korral võimalikud erinevad kombinatsioonid, mis sisaldavad madalamat või kõrgemat toodetavat aktiivvõimsust ning võimsuslülitite asendeid. Sedamööda võib tekkida olukord, milles teatud meetod osutub kindla elektriijaama jaoks sobilikumaks. Teisest küljest, käesoleva juhtimissüsteemi vastavusse viimine objekti vajaduste jaoks pole siiski väga keeruline.

Nõnda saab lugeda käesoleva magistritöö raames püstitatud hüpoteesi paikapidavaks. Teatud elemente ja komponente kasutades ning õigeid ülesehituslikke struktuure rakendades on võimalik saavutada kindlas kohas nagu põhivõrguga seonduvas liitumispunktis reaktiivvõimsuse mõõteväärtuse minimeerimine. Samuti saab eristada generaatoreid ning reguleerida nende reaktiivvõimsust optimaalset langetades sealjuures mõningates elektriijaama liinides võimsuskadusid. Lisaks kaasnevad generaatorite jaotlate ja ülekandetraafode vahelistes ühendustes reaktiivvõimsuse kulgemise vähendamisega ühtlasi ka nendes tekkivad madalamad võimsuskaod. Samas, kokkuvõtlikult polnud need märkimisväärselt suured ning ennekõike tekib suurem majanduslik efektiivsus ikkagi reaktiivvõimsuse maksumusega.

Sedamööda tuleks pidada ühe või mitme generaatori reaktiivvõimsuste reguleerimise üldise juhtimissüsteemi olemasolu õigustatuks. Vastavat muidugi nende ettevõtete jaoks, mis omavad kohapealset reaktiivvõimsuse genereerimise võimekust ning samuti seesmiseid reaktiivvõimsust vajavaid tarbijaid. Teoreetiliselt kannatab magistritöö käigus kirjeldatud lahendusega ka ainult pingereguleerimise teenust osutada. Sellisel juhul aga ei osutu tõenäoliselt vajalikuks väga keerulisi regulaatoreid rakendada ning majanduslik kasu jääb väiksemaks.

Kokkuvõtlikult arendati välja mitme generaatori reaktiivvõimsust eraldi või koos reguleerida lubav konstruktsioon, mida katsetati nii reaalaja simulaatori kui ka tööstuskontrolleriga. Saadud tulemused näitasid kasutatud meetodite paikapidavust. Tulenevalt sellest saab käesolevat magistritööd alusena võttes välja töötada erinevatele elektriijaamadele või tööstusobjektidele sobivaid generaatorite reaktiivvõimsuseid reguleerida võimaldavaid lahendusi.

SUMMARY

In the framework of the present master's thesis, the possibility of how to minimize the transmission of reactive energy at the measurement point connected to the transmission network was researched. Main specification was that it is implementing by using on-site internal reactive power generating elements of a power plant or industrial facility, such as synchronous generators. In principle, such activities still require the presence of customers in them who need reactive power. As a result, the operating costs of the respective company and the active and reactive power losses of certain connections within the facility would decrease.

For reaching to this goal, a multi-generator reactive power control system was constructed using a real-time simulator, also known as RTDS, based on a real power plant owned by VKG OÜ. In addition various methods were used to prove which one of them is reasonable to share reactive power between several generators. The most important of these were equal, proportional and measurement-based method. Each of these has its advantages and disadvantages and was discussed in more detail in Chapter 2 of the Master's Thesis. Also, the structure of a few reactive power regulators were pointed out and the nature of these differences were explained.

In conclusion, a control system for regulating the reactive power of several generators was developed in RTDS, which would be able to apply selected methods and allowed to reduce the amount of reactive power measured at the connection point. Among other things, the necessary inputs were highlighted, through which the information reaches the general management system of the regulators and at the same time provide the latter with information about what is happening in the electricity network. This is extremely important for precise adjustments and for keeping the reactive powers and the bus voltages of the generators within the permissible limits.

Above all, the use of a real-time simulator meant the creation of a realistic environment characteristic of a real power plant. On the other hand, it did not directly take into account the self-operating time, hardware and software limitations of the industrial controller on which the entire control system is located. Therefore, it proved necessary to control the designed and only program-based solution with industrial controllers because those are installed in actual power plants or other industrial facilities. This was done using an NI industrial controller, but here only by adjusting the reactive power of one generator, assuming that it is possible to determine whether the set objectives have been met. However, the LabView program-based architecture of the industrial controller were similar to RSCAD, through which the real-time simulator is used, so there is only need to activate sets of links that take into account the differences between several generators.

The results in the form of graphs illustrated the achievement of the main goal, which was to minimize the exchange of reactive power measured at the connection point between the transmission network and the power plant, using both solutions described above. It is worth mentioning here, that a lot depends on setting the right parameters used in different controllers. In this way, it is possible to increase or decrease the control speed and the sensitivity to the processes taking place in the electrical system. In the present case, the respective definitions were left as being effective in achieving the desired results, but it is understood that by modifying them more precisely, certain control parameters which for example determining the response can be raised to a certain value, such as the rate of reactive power change measured at the connection point. Among other things, in a real power plant, it is likely to be necessary to reconfigure them according to local conditions.

The graphs at the end of Chapters 3 and 4 prove the operation of the described control system structure and the validity of the applied methodology. Of course, only a few figures were presented in these chapters, but at the same time they were graphs that well characterized the result, and the rest would contain the same result, only with different generators and their power combinations. However, the situation is different within methods of sharing reactive power between several generators. In Chapter 3.5, it was found that a very large reduction in active power losses between different versions would not be achieved with used example power plant. This eliminates the need for more complex marginal cost comparisons and provides a simpler solution. At the same time, it is still worth avoiding the operation of the generators in the vicinity of the maximum permissible reactive power limits. Here again, different combinations are possible for several generators, which contain lower or higher active power output and positions of the circuit breakers. This can lead to a situation where a certain method proves to be suitable for a particular object. However, adapting this control system to the needs of the site is not very difficult.

As a result, the hypothesis raised in the framework of this master's thesis can be considered to be valid. By using certain elements and components and by applying the right structural approaches, it is possible to minimize the measured value of the reactive power at a specific location, such as the connection point with the transmission network. It is also possible to differentiate the generators and adjust their reactive power optimally, thereby reducing power losses on some power plant lines. In addition, reducing the flow of reactive power in the connections between the generator bus and the transformers also results in lower power losses. At the same time they were not significantly large and mainly greater economic efficiency still arises at the cost of reactive power. In summary, solutions suitable for different power plants or industrial objects can be developed on the basis of this master's thesis.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] J. D. Glover, M. S. Sarma ja T. J. Overbye, *Power System Analysis and Design*, Connecticut, USA: Cengage, 2010.
- [2] P. Kundur, *Power System Stability*, 1998.
- [3] N. M. Tabatabaei, N. B. A. J. Aghbolaghi ja F. Blaaberg., *Reactive Power Control in AC Power Systems*, Springer, 2007, p. 631 pp.
- [4] G. Klemptner ja I. Kerszenbaum, *Handbook of Large Turbo-Generator Operation and Maintenance, Third Edition*, John Wiley and Sons, Inc, 2018.
- [5] I. Boldea, *Synchronous Generators*, New York, USA: CRC Press, 2016.
- [6] L. L. Grigsby, *Power System Stability and Control*, CRC Press LLC, 2012.
- [7] A. J. Wood, B. F. Wollenberg ja G. B. Sheblé, *Power Generation Operation and Control*, New Jersey, USA: Wiley, 2014, p. 629.
- [8] W. Levine, *The Control Handbook*, New Jersey, USA: CRC Press/IEEE, 1996.
- [9] J. Leigh, *Control Theory, 2nd Edition*, Elsevier, 2004.
- [10] J. Zhu, *Optimization of power system operation, 2nd Edition*, Piscataway: IEEE Press/Wiley, 2015, p. 662.
- [11] A. Samimi ja A. Kazemi, *Coordinated Volt/Var Control in Distribution Systems*, Applied Sciences, vol. 6, no. 1, 2016.
- [12] G. C. Karyonidis, C. S. Demoulias ja G. K. Papagiannis, *A Nearly Decentralized Voltage Regulation Algorithm for Loss Minimization in Radial MV Networks With High DG Penetration*, 2016.
- [13] D. K. Sarkar, *Thermal power plant : design and operation*, Amsterdam: Elsevier, 2015, p. 584.
- [14] Riigi Teataja , „Elektrisüsteemi toimimise võrgueeskiri 14.02.2019 nr 10,“ 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/121022019002>. [Kasutatud 17 November 2019].

- [15] Elering AS, „Elering AS elektrienergia maksustamine,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://elering.ee/vorguteenus>. [Kasutatud 11 Aprill 2020].
- [16] A. Cimino ja P. R. Pagilla, *Reactive Power Control for Multiple Synchronous Generators Connected in Parallel*, in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 31, no. 6, pp. 4371-4378, Nov. 2016.
- [17] W. Shang, S. Zheng, L. Li ja M. Redfern, *A New volt/VAR Control for Distributed Generation, 2015*
- [18] R. Kehlhofer, B. Rukes, F. Hannemann ja F. Stirnimann, *Combined-Cycle Gas and Steam Turbine Power Plants, 3rd Edition*, PennWell, 2009.
- [19] E.-H. M.E ja C. G.S, *Optimal Economic Operation of Electric power Systems*, New York: Academic Press INC., 1979, p. 278.
- [20] J. Dragosavac, Ž. Janda, J. Pavlović ja Z. Ćirić, *Reactive Power Dispatching Among Generating Units Connected to Point of Common*, 2019 IEEE Milan PowerTech, Milan, Italy, 2019, pp. 1-6.
- [21] J. Dragosavac, Ž. Janda ja J. V. Milanović, *Coordinated Reactive Power-Voltage Controller for Multimachine Power Plant*, in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 27, no. 3, pp. 1540-1549, Aug. 2012.
- [22] R. Anilkumar, G. Devriese ja A. K. Srivastava, *Intelligent Volt/VAR Control Algorithm for Active Power Distribution System to Maximize the Energy Savings*, 2015 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Addison, TX, 2015, pp. 1-8.
- [23] J. Dai, H. Castro, J. Guo, T. Khandelwal, S. Shokooh ja F. Shokooh, *Automatic Generation Control System for an Industrial Facility with Onsite Generation*, 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, Seattle, WA, 2009, pp. 1-8.
- [24] S. Auchariyamet ja S. Sirisumrannukul, *Optimal Daily Coordination of Volt/VAr Control Devices in Distribution Systems with Distributed Generators*, 45th International Universities Power Engineering Conference UPEC2010, Cardiff, Wales, 2010, pp. 1-6.
- [25] Y. Kataoka ja Y. Shinoda, *Voltage Stability Limit of Electric Power Systems With Generator Reactive Power Constraints Considered*, in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, no. 2, pp. 951-962, May 2005

- [26] L. Ran, F. Spinato, P. Taylor, R. Wilson ja H. Jackman, *Cordinated AVR and tap changing control for an autonomous industrial power system*, IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, vol. 153, no. 6, pp. 617-623, November, 2006.
- [27] R. H. Bishop, *Mechatronic system control, logic, and data acquisition*, Boca Raton, USA: CRC Press, 2008, p. 2061.
- [28] M. S. Tavazoei, *From Traditional to Fractional PI Control: A Key for Generalization*, IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 6, no. 3, pp. 41-51, 2012.
- [29] R. T. Stefani, J. Clement J. Savant, B. Shahian ja G. H. Hostetter, *Design of feedback control systems, 3rd Edition*, Boston, USA: Saunders College, 1994, p. 819.
- [30] S. Basu ja A. K. Debnath, *Power plant instrumentation and control handbook: a guide to thermal power plants*, London, UK: Elsevier, 2014, p. 919.
- [31] A. Parr, *Industrial control handbook, 3rd Edition*, Oxford, UK: Newnes, 1998, p. 802.
- [32] K. Kamel, *Programmable logic controllers : industrial control*, New York, USA: McGraw-Hill Education, 2014, p. 419.
- [33] N. S. Nise, *Control Systems Engineering*, Pomona, USA: John Wiley Sons, 2011, p. 915.
- [34] A. Arockia ja B. Raj, *FPGA-based embedded system developer's guide*, Boca Raton, USA: CRC Press, 2018, p. 806.
- [35] S. Skogestad ja I. Postlethwaite, *Multivariable feedback control : analysis and design*, Chichester, USA: Wiley, 1996, p. 559.
- [36] G. F. Franklin, J. D. Powell, A. Emami-Naeini ja S. H.S., *Feedback control of dynamic systems, 7th Edition*, Boston, USA: Pearson, 2015, p. 880.
- [37] Y. Li, K. H. Ang ja G. C. Y. Chong, *PID control system analysis and design*, IEEE Control Systems Magazine, vol. 26, no. 1, pp. 32-41, 2006.
- [38] VKG OÜ, *VKG OÜ elektripaigaldise tehnilised aruanded*, 2019.
- [39] RTDS Technologies, *RTDS/RSCAD Introductory course material*, 2015.
- [40] RTDS Technologies, *RTDS User's Manual*, 2015.

- [41] „National Instruments,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ni.com/en-us/shop/select/compactrio-controller>. [Kasutatud 11 April 2020].
- [42] National Instruments, „CompactRIO Systems,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.ni.com/en-us/shop/compactrio.html>. [Kasutatud 4. Oktoober 2019].
- [43] National Instruments, „C/C++ Embedded System Design Tools,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.ni.com/en-us/innovations/white-papers/13/c-c---embedded-system-design-tools.html>. [Kasutatud 4. Oktoober 2019].
- [44] National Instruments, „cRIO-9045 Specifications,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://www.ni.com/pdf/manuals/376783f_02.pdf. [Kasutatud 4. Oktoober 2019].
- [45] National Instruments, „cRIO-9045 CompactRIO Controller,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ni.com/en-us/support/model.crio-9045.html>. [Kasutatud 4. Oktoober 2019].
- [46] National Instruments, „NI-9205,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.ni.com/en-us/support/model.ni-9205.html>. [Kasutatud 4. Oktoober 2019].
- [47] National Instruments, „NI 9263,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://sine.ni.com/psp/app/doc/p/id/psp-171/lang/en>. [Kasutatud 4. Oktoober 2019].
- [48] National Instruments, „NI 9205 Datasheet,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://www.ni.com/pdf/manuals/378020a_02.pdf. [Kasutatud 4. Oktoober 2019].
- [49] RTDS Technologies Inc., „GTIO cards,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://legacy.rtds.com/the-simulator/our-hardware/gtio-cards/>. [Kasutatud 4. Oktoober 2019].