



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

SÜNKROONGENERAATORI ERGUTUSSÜSTEEMI
(BASLER DECS-250) REAALAJASIMULATSIOONIDE
KATSESTENDI VÄLJATÖÖTAMINE JA ANALÜÜS
DESIGN AND ANALYSIS OF A TEST BED FOR SYNCHRONOUS GENERATOR
EXCITATION CONTROL SYSTEM (BASLER DECS-250) AND REAL TIME DIGITAL
SIMULATOR

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Mihkel Saar

Üliõpilaskood: 163285

Juhendaja: Jako Kilter, dotsent; Tanel Sarnet,
nooremteadur

Tallinn, 2019

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: Mihkel Saar

Lõputöö liik: Magistritöö

Töö pealkiri: : Sünkroongeneraatori ergutussüsteemi (Basler DECS-250) reaajasimulatsioonide katsestendi väljatöötamine ja analüüs

Kuupäev: 24.05.2019

60 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): dotsent Jako Kilter, nooremteadur Tanel Sarnet

Töö konsultant (konsultandid):-

Sisu kirjeldus:

Magistritöö eesmärk on koostada ergutusregulaatori Basler DECS-250 katsestend ja verifitseerida selle töö vastavust standardis IEEE 421.5 kirjeldatud mudelile. Reaalse ergutusregulaatori kõrval kasutatakse vajalike elektrisüsteemi osade – võrgu ja generaatori reaajasimulatsioone.

Töös keskendutakse elektrisüsteemi stabiilsuse seisukohast olulisele pingestabiilsusele, samuti tutvustatakse sünkroongeneraatorite ja nende pingereguleerimist teostatavate ergutusregulaatorite tööpõhimõtteid. Vaatluse all olevaks seadmeks on digitaalne ergutusregulaator Basler DECS-250. Seejuures tutvutakse lähemalt seadme funktsionaalsusega ning IEEE standardis 421.5 toodud ergutussüsteemi mudeliga AC8B, mis võimaldab modelleerida Basler DECS-250 tööd. Samuti antakse ülevaade katsestendi loomisest ning vajalikest simulatsioonidest reaajasimulaatoris RTDS.

Nii Basler DECS-250 kui ka ergutusregulaatori matemaatilise mudeliga teostatakse kolm katset ning võrreldakse tulemusi Võrgueeskirjas sätestatuga. Katsetest järeldub, et valdavalt käituvad pingeregulaator ja matemaatiline mudel sarnaselt, ent olenevalt katsest esineb mittevastavusi kehtiva Võrgueeskirjaga.

Magistritöö lisab varasematele uurimustele uut perspektiivi ning võimaldab ka tulevikus matemaatiliste mudelite ja ergutusregulaatoriga sarnase eesmärgiga katseid läbi viia.

Märksõnad: ergutusregulaator, reaajasimulatsioon, sünkroongeneraator, katsestend, RTDS, Basler DECS-250

ABSTRACT

Author: Mihkel Saar

Type of the work: Master Thesis

Title: Design and Analysis of a Test Bed for Synchronous Generator Excitation Control System (Basler DECS-250) and Real Time Digital Simulator

Date: 24.05.2019

60 pages (the number of thesis pages including appendices)

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, Early Stage Researcher Tanel Sarnet

Consultant(s): -

Abstract:

The aim of the Master thesis is to compose a test bed of excitation control system Basler DECS-250 and to validate its outcome against the model defined in the IEEE standard 421.5. Other elements except the excitation control system – the power grid and generator, are simulated in real time.

The thesis gives an overview of the problem of voltage stability in the power system and the working principles of synchronous generators and their excitation control systems, that are responsible for automatic voltage regulation. The device under investigation is a digital excitation control system Basler DECS-250. A closer look is taken at the functionality of the device and at the AC8B exciter model described IEEE standard 421.5. According to the standard the model should be able to simulate the work of the device. In addition, an overview is given of necessary models used in the real time simulator RTDS and the design and composition process of the test bed is described.

In total three experiments were conducted with the test bed and the results were compared to the mathematical model described in the standard and to local legislation. It can be concluded that as a result of voltage change the performance of voltage regulator was generally similar to mathematical model, however the outcome was in some cases not in line with the regulation.

Master thesis adds new perspective to previous researches and allows to continue research and perform tests with mathematical models and excitation control systems in the future.

Keywords: excitation control system, real time digital simulator, synchronous generator, test bed, RTDS, Basler DECS-250

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Sünkroongeneraatori ergutussüsteemi (Basler DECS-250) reaajasimulatsioonide katsestendi väljatöötamine ja analüüs
Lõputöö teema inglise keeles:	Design and Analysis of a Test Bed for Synchronous Generator Excitation Control System (Basler DECS-250) and Real Time Digital Simulator
Üliõpilane:	Mihkel Saar, 163285AAVM
Eriala:	Elektroenergeetika
Lõputöö liik:	magistritöö
Lõputöö juhendaja:	dotsent Jako Kilter; nooremteadur Tanel Sarnet
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	30.06.2019
Lõputöö esitamise tähtaeg:	24.05.2019

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Tulenevalt tootmiseseadmete struktuuri muutumisest elektrisüsteemides ja selle mõjust elektrisüsteemi stabiilsusele on järjest olulisem testida tootmiseseadmete vastavust võrgueeskirjades esitatud nõudmistele. Tavapäraselt teostatakse vastavustestid reaalsete tootmiseseadmete katsetamisega, et hinnata juhtimissüsteemide talitlust ning vastavaust võrgueeskirja nõuetele. Elektrisüsteemide modelleerimise meetodika arenguga ja reaalaaja-simulatsioonide võimekusega on tekkinud alternatiivne lahendus vastavustestide läbiviimiseks. Reaalaajasimulatsioonides kujutatakse matemaatiliselt elektrivõrku ja tootmiseseadet, mida juhitakse füüsiliste tootmiseseadme juhtimissüsteemidega. Selline matemaatiliste mudelite ja füüsiliste seadmete kombinatsioon võimaldaks kiirendada seadmete lõplikku seadistust ja vähendada reaalsete testide mahtu vastuvõtu-katsetes. Sellest tulenevalt on olulise tähtsusega koostada reaalne tootmiseseadme juhtimissüsteemil põhinev katsestend reaalaajasimulatsioonideks, millega oleks võimalik põhjalikumalt analüüsida simulatsioonidel põhinevate vastavuskatsete võimalikkust.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on koostada Basler DECS-250 ergutussüsteemi katsestend RTDS reaalaja-simulaatorile. Selleks koostatakse käepärane meetoodika ja seadmete kompositsioon, millega ühendatakse ergutusüsteem reaalajasimulaatoriga ning nende simulatsioonide alusel analüüsitakse katsestendi talitlust ja verifitseeritakse simulatsioonide tulemusi AC8B lihtsustatud ergutussüsteemi matemaatilise mudeliga.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Basler DECS-250 ergutussüsteem ja selle tehnilise lahenduse omadused.
- AC8B ergutussüsteemi mudeli omadused ja modelleerimise iseärasused.
- Basler DECS-250 ergutussüsteemi RTDS reaalaja simulaatoriga ühendamise meetoodika välja töötamine.
- Basler DECS-250 ergutussüsteemi seadistuse teostamine.
- Lõputöö katselises osas võrreldakse Basler DECS-250 ergutusüsteemi ja AC8B mudeli talitlust.
- Lõputööga koostatakse Basler DECS-250 ergutusüsteemi uudne verifitseeritud katsestend.

4. Lähteandmed

Teoreetiline info leitakse sobilikest kirjandusallikatest (raamatud ja teadusartiklid, andmebaasid – ennekõike IEEE Xplore ja ScienceDirect). Elektrivõrgu koostamiseks vajalikud andmed saadakse juhendaja käest.

5. Uurimismeetodid

Töö teoreetiline taust saadakse kirjandusest. Ühendusmeetodi ja seadmete kompositsiooni lahendamine ja simulatsioonide analüüside teostamine. Matemaatilise mudeli võrdlus reaalse ergutusregulaatoriga teostatakse tarkvaras RSCAD. Magistritöös esitatud skeemid on koostatud programmis EPlan Electric P8.

6. Graafiline osa

Graafiline osa jaotatakse töö põhiosa ja lisade vahel vastavalt nende mahule ja iseloomule.

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE.....	3
ABSTRACT	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	5
EESSÕNA.....	8
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	9
SISSEJUHATUS	10
1. PINGE REGULEERIMINE ELEKTRISÜSTEEMIS.....	12
1.1 Elektrisüsteemi stabiilsus.....	12
1.2 Sünkroonmasinad ja ergutussüsteemid.....	13
1.3 Nõuded pingeregulaatoritele.....	14
1.4 Ergutusregulaator Basler DECS-250.....	15
1.5 Basler DECS-250 funktsionaalsus.....	15
1.5.1 Staatori- ja rootorivoolu piirajad.....	16
1.5.2 Elektrisüsteemi stabilisaator	17
1.5.3 Automaatne sünkronisaator	18
1.5.4 Releekaitsefunktsioonid ja mõõteseadmetega ühilduvus	18
1.6 Mudel AC8B	19
1.7 Katsestendi ülesehitusest ja praktilisest vajadusest.....	20
1.8 Sarnased uurimused	21
2. REAALAJASIMULATSIOONIDEKS KASUTATAV MUDEL JA SELLE KOHANDAMINE KATSETUSTEKS 25	
2.1 Võrgu mudel.....	25
2.2 Ergutusregulaatori ja generaatori matemaatiline mudel	26
2.3 Ergutusregulaatori piirajate matemaatilised mudelid.....	28
2.4 Elektrisüsteemi stabilisaatori mudel.....	32
3. KATSESTENDI KOOSTAMINE JA TULEMUSTE VERIFITSEERIMINE.....	35
3.1 Katsestendi väljatöötamine	35
3.2 Basler DECS-250 seadistamine.....	41
3.3 Teostatavate katsete kirjeldus	43
3.4 Katsete tulemused ja järeldused	44
KOKKUVÕTE	48
SUMMARY	51
KASUTATUD KIRJANDUS	53
LISAD	55
Lisa 1 Katsestendi kasutusjuhend	56

EESSÕNA

Magistritöö on kirjutatud Tallinna Tehnikaülikoolis inseneriteaduskonnas elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudis.

Magistritöö põhineb dotsent Jako Kilteri välja pakutud ideel koostada sünkroongeneraatori ergutusregulaatori reaalarjasimulatsiooni katsestend, mis põhineb ergutusregulaatoril Basler DECS-250. Magistritöö kirjutamiseks kasutatud kirjanduse osas pärinevad soovituslikud materjalid osaliselt juhendajatelt, ent on peamiselt leitud sihtotsingu teel veebist erialaseid artikleid koondavatest andmebaasidest. Magistritöös sisendina kasutatud elektrivõrgu mudel on juhendaja, nooremteadur Tanel Sarneti poolt varasemalt välja töötatud. Kasutatav ergutusregulaator Basler DECS-250 on Tallinna Tehnikaülikooli omanduses olev seade, millele magistritöö autoril oli töö kirjutamise ajal ligipääs. Samuti kuulub ülikoolile digitaalne reaalarjasimulaator – need kaks komponenti on olulisimad katsestendi osad. Seadmete kasutamisel on lähtutud tootjapoolsetest kasutusjuhenditest. Tulenevalt magistritöö praktilisest eesmärgist – koostada reaalne katsestend, on valdav osa tööst valminud Tallinna Tehnikaülikoolis.

Magistritöö autor soovib tänada oma juhendajaid, dotsent Jako Kilterit ja nooremteadur Tanel Sarnetit asjakohaste ettepanekute ja sujuva koostöö eest; samuti doktorant-nooremteadureid Tarmo Trummalit ja Marko Tealast osutatud abi eest katsestendi kokkupanekul ja simulatsiooniga seotud probleemide lahendamisel. Samuti soovib autor tänada oma tööandjat mõistva suhtumise eest.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

Magistritöös on kasutatud lühendid ühes (inglise- ja) eestikeelsete selgitustega on esitatud alljärgnevalt.

AC8B	ergutusregulaatori matemaatiline mudel vastavalt IEEE standardile 421.5
AVR	automaatne pingereguleerimine (<i>Automatic Voltage Regulator</i>)
DECS	digitaalne ergutuskontrolli süsteem (<i>Digital Excitation Control System</i>)
FCR	ergutusvoolu reguleerimine (<i>Field Current Regulator</i>)
FVR	ergutuspinge reguleerimine (<i>Field Voltage Regulator</i>)
PF	võimsusteguri reguleerimine (<i>Power Factor</i>)
RTDS	digitaalne reaajasimulaator (<i>Real Time Digital Simulator</i>)

SISSEJUHATUS

Töö teema pakuti välja lõputöö juhendajate poolt ning osutus valituks peamiselt kahel põhjusel. Ülikool oli värskest soetanud uue ergutusregulaatori ning seetõttu oli võimalik läbi viia katsetusi, millega sarnaseid ei olnud varem TTÜ-s tehtud. Teisalt sai autor sellega võimaluse viia end kurssi elektrivõrgu automaatikaseadmete reaalse seadistusprotsessiga, mille maht ja keerukus on sobivad magistritöö konteksti arvestades.

Varasemalt on TTÜ-s teostatud mitmeid katseid erinevate kaitsereleede ja häiresalvestite uurimisel reaajasimulaatoriga ning need on olnud aluseks erinevate magistritööde koostamisel. Samas ei ole TTÜ-s varasemalt sellisel viisil uuritud sünkroongeneraatorite ergutusregulaatorite tööd. Reaajasimulaatori abil ergutusregulaatori testimine võimaldab enne generaatori käikulaskmist katsetada selle tööd erinevates olukordades ning seeläbi vähendada kulutusi elektrijaama käiku võtmise katsete ajal. Ühtlasi minimeerib säärane katsevahend võimalust, et reaalsete katsetuste ajal tekitatakse kahjustusi näiteks generaatorile endale.

Töös on kasutatud RTDS-i tootjapoolset modelleerimistarkvara RSCAD, mis on võimekas vahend erinevate võrgu elementide simuleerimiseks – autori jaoks oli see esmaseks kogemuseks taolise modelleerimistarkvara kasutamisel. Erinevate graafiliste skeemide koostamiseks kasutati joonestustarkvara EPlan Electric, kuna sellele oli töö autoril ligipääs igapäevatööga seotud ülesannetest. Kuna antud programm on loodud elektriskeemide joonestamiseks, siis andis see võimaluse hoiduda teiste tehnilise joonestamise vahendite kasutamisest, kus skeemide koostamine ja vajadusel ka muutmine oleks olnud oluliselt vaevalisem.

Lõputöö peamine eesmärk oli koostada ergutusregulaatori katsestend, millega on võimalik verifitseerida ergutusregulaatori töö vastavust IEEE standardis 421.5 kirjeldatud matemaatilisele mudelile AC8B. Selleks oli vajalik kohandada lõputöö juhendaja poolt varasemalt koostatud elektrivõrgu mudelit modelleerimistarkvaras RSCAD, leida lahendus ergutusregulaatori ühendamiseks reaajasimulaatoriga, kohandada varasemalt kasutatud ergutusregulaatori seadistust katsestendile sobivaks ja ühendada ergutusregulaator reaajasimulaatoriga.

Töö esimene peatükk käsitleb ergutussüsteeme ja nende kasutust. Peatükis keskendutakse sünkroonmasinate ergutamiseks kasutatava seadme Basler DECS-250 erinevatele kasutusvõimalustele ning tutvustatakse seadme kaitsefunktsioone ja nende vajalikkust. Samuti antakse lühiülevaade viimasel paaril aastakümnel läbi viidud sarnastest uurimustest nii Põhjamaade kui ka idanaabrite teadlaste poolt ning pakutakse välja koostatava katsestendi põhimõtteline lahendus.

Teises peatükis tutvustatakse reaajasimulatsioonides kasutatavate ergutusregulaatori ja selle piirajate mudelite ülesehitust ja nende kohandamist vastavalt lõputöö vajadustele. Samuti keskendutakse võrgu mudelile, mille puhul on aluseks üks Eestis toimiv elektrijaam ja sellega seotud elektrivõrk.

Lõputöö kolmandas peatükis pühendatakse katsestendi koostamisele, tutvustatakse katsestendi koostamisel kasutatavaid seadmeid ning nende alternatiivseid kasutusvõimalusi. Seejärel keskendutakse teostatavate katsetuste kirjeldamisele ning põhjendatakse, miks on valitud just sellised katsed. Põgusalt peatutakse ergutusregulaatori sätete muutmisel, mis on vajalikud tulenevalt katsestendi eripäradest. Sellele järgneb katsetulemuste kirjeldus ning nende analüüs ja võrdlus nii kehtivate õigusaktide kui ka varasemate samateemaliste uurimustega.

Loodav katsestend on eelkõige vajalik generaatorite ergutusregulaatorite talitlemise kontrollimiseks. Katsestend pakub võimaluse kontrollida kõiki ergutusregulaatori sätete väärtusi enne kui seade ühendatakse sünkroongeneraatoriga ning hakatakse läbi viima reaalseid katsetusi. Muuhulgas võimaldab see vältida asjatuid kulutusi korduvate katsetuste tegemisel. Kindlasti on võimalik loodavat katsestendi kasutada ka ülikooliõpingutes, seotud teemasid võib leida nii releekaitse kui ka elektrisüsteemi stabiilsuse valdkonnast.

Magistritöö raames praktilise ülesande lahendamine andis autorile hea võimaluse omandatud teadmiste rakendamiseks. Tulenevalt töö keerukuse astmest tuli autoril lähemalt tutvuda ka enda jaoks täiesti uute teemadega. Seeläbi sai autor töö kirjutamisest uusi teadmisi ja väga hea kogemuse.

1. PINGE REGULEERIMINE ELEKTRISÜSTEEMIS

1.1 Elektrisüsteemi stabiilsus

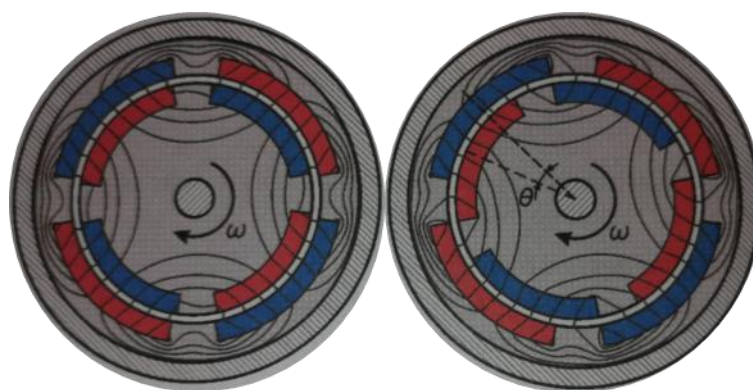
Elektrisüsteemi stabiilsust saab üldiselt defineerida kui elektrisüsteemi omadust säilitada normaalolukorras tasakaaluolek ning saavutada vastuvõetav tasakaalupunkt pärast häiringu möödumist [1]. Süsteemis võivad aset leida nii väikesed, pidevalt toimuvad häiringud kui ka tõsisemad, lühistest või suurte elektrijaamade väljalülitumisest tingitud häiringud [2]. Elektrisüsteemi mittestabiilsust saab kirjeldada paljudel erinevatel viisidel, kuid traditsioonilises käsitluses on selle all silmas peetud kõikide elektrisüsteemis töötavate sünkroongeneraatorite sünkroonse töö säilitamist. Samas võib mittestabiilsus esineda ka ilma sünkronismi kaotamiseta, näiteks lihtsa generaatorist ja asünkroonmootorist ning neid ühendavast elektriliinist koosneva süsteemi puhul võib probleemseks saada tarbija pinge langemine alla aktsepteeritava piiri. [1] Sellist pinge mittestabiilsust nimetatakse ka pinge kollapsiks [2].

Pinge mittestabiilsuse peamiseks põhjusteks on suurte võimsuste ülekandmine üle pika elektrilise vahemaa [3]. See tähendab, et pingestabiilsuse seisukohast on oluline tarbijate paiknemine võimalikult elektrijaamade lähedal või tugevate liinide olemasolu tarbimis- ja tootmissõlmede vahel. Samas on võimalik pingestabiilsust parendada ka erinevate automaatsete regulaatorite kasutamise ja automaatsete lülituste toimumisega. Pingestabiilsust aitavad tagada pinge ja aktiivvõimsuse reguleerimine, selleks saab kasutada näiteks põikkompenseerimist, trafo astmelülite lülitamist ning sünkroonmasinate ergutuse reguleerimist. Pinge reguleerimist jagatakse toimeaja järgi primaar- (ajaskaala millisekunditest kuni mõne sekundini), sekundaar- (ajaskaala ühest minutist mõne minutini) ja tertsiaalreguleerimiseks (ajahorisondiga alates viiest minutist). Aeglasmate regulaatoritena kasutatakse peamiselt trafode astmelülite ning põikkompensaatorite lülitamist – primaarreguleerimist teostavad peamiselt sünkroongeneraatorite ergutusregulaatorid. [2]

Käesolevas töös käsitletaksegi sünkroongeneraatori ergutussüsteemi tööd digitaalse ergutusregulaatori Basler DECS-250 põhjal. Elektrisüsteemi vaatenurgast peaks ergutussüsteem pakkuma efektiivse mooduse pinge kontrollimiseks ja süsteemi stabiilsuse parendamiseks [1]. Ergutussüsteem peab olema võimeline häiringutele kiiresti reageerima, parendamaks dünaamilist stabiilsust ning reguleerimaks generaatori ergutust sellisel viisil, mis parandaks elektrisüsteemi staatilist stabiilsust [1]. Tagamaks ergutussüsteemi ootuspärast tööd, mis arvestaks elektrisüsteemi omapäradega ja võimaldaks toime tulla erinevate süsteemihäiringutega, on vaja regulaator õigesti seadistada [4]. Erinevate matemaatiliste mudelite põhjal leitud pingeregulaatorite optimaalsete seadistuste kontrollimine ongi käesolevas töös väljatöötatava katsestendi põhieesmärk.

1.2 Sünkroonmasinad ja ergutussüsteemid

Sünkroonmasin kujutab endast vahelduvvoolu elektrimasinat, mille rootori pöördlemine on sünkroonne staatori magnetvälja pöördlemisega. Sünkroonmasinad on suuremate võimuste juures elektrisüsteemides enimlevinud elektrimasinate liik [1]. Suurem osa elektrienergiast toodetakse sünkroongeneraatorite abil, suuri koormusi käitatakse sageli sünkroonmootorite abil ning sünkroonkompensaatoreid kasutatakse reaktiivenergia kompenseerimiseks ja võrgu pinge reguleerimiseks. Masin koosneb kahest põhiosast: paigalseisvast staatorimähisest ja rootoril asuvast ergutusmähisest ehk induktorist. [1] Staatori- ja ergutusmähistes voolava voolu toimel tekkivad magnetväljad tekitavad vastastikuse jõu, mille toimel tõmmatakse iga staatori lõunapooluse vastu üks ergutusmähise põhjapoolus ja iga staatori põhjapooluse vastu üks ergutusmähise lõunapoolus [5].



Joonis 1.1. Sünkroonmasina staatori ja rootori pooluste vastastikune asend tühijooksul (vasakul) ning pooluste nihkumine koormusmomendi mõjul (paremal) [5]

Tühijooksul on masina ergutus- ja staatorimähise poolused eelkirjeldatud viisil üksteise külge „kleepunud“ (Joonis 1.1 vasakul), vastavalt sellele, kas rootori pöördemoment sunnib rootorimähise tekitatud välja pooluseid aeglustama või kiirendama staatorivälja pöördlemist, töötab sünkroonmasin kas mootori või generaatori režiimis [5]. Ergutusvoolu muutmisel on võimalik sünkroonmasinat panna kas reaktiivvõimsust tootma või tarbima, selleks tuleb masinat vastavalt üle- või alaergutada.

Ergutussüsteemi ülesandeks on ergutusmähise varustamine õige tugevusega alalisvooluga [2]. Tänapäevane ergutussüsteem omab lisaks ergutuspinge reguleerimisele ka palju teisi funktsioone – näiteks täidab kaasaegne ergutusregulaator ka erinevate kaitsete ja piirajate ülesandeid. Lisaks saab arvesse võtta kaugema tarbimissõlmega ühendavate liinide takistusi, et tagada õiges kohas soovitud pinge ning kasutada ka elektrisüsteemi stabilisaatorit, mis aitab summutada generaatori võnkeprotsesse. Ergutussüsteeme liigitatakse toimimispõhimõtte alusel alalis- ja vahelduvvoolu-

generaatoritel põhinevateks ja staatilisteks [2]. Alalis- ja vahelduvvoolugeneraatoritega ergutus-süsteemid kasutavad ergutusvoolu tekitamiseks erinevaid elektrimasinaid. Ergutusgeneraatorid asuvad üldiselt generaatoriga samal võllil, kuid kasutada võidakse ka eraldi mootoriga käitavat ergutusgeneraatorit.

Alalisvooluergutussüsteemide puhul juhitakse ergutusvool ergutisse kontaktrõngaste ja harjade kaudu. Sääraseid süsteemid on olnud ajalooliselt väga levinud, kuid eelmise sajandi keskpaigas alustati üleminekut peamiselt vahelduvvooluergutite kasutamisele [1]. Elektri jaamade suhteliselt pika eluea tõttu ei kao alalisvooluergutid lõplikult veel nii pea ning väiksemate generaatorite puhul kasutatakse selliseid lahendusi tänaseni. Vahelduvvooluergutid saab omakorda jagada kahte kategooriasse: statsionaarse- ja pöörleva alaldiga ergutid. [2] Statsionaarse alaldi puhul alaldatakse ergutusgeneraatori poolt genereeritud vahelduvvoolu generaatori paigalseisvas osas ning ergutusvoolu rootorile ülekandmiseks tuleb kasutada sarnaselt alalisvoolu ergutussüsteemidele kontaktrõngaid ja harjasid. Pöörlevate alalditega süsteemide puhul on võimalik kontaktrõngaste ja harjade kasutamise vältimine. Ergutusvoolu tootva vahelduvvoolugeneraatori induktor asub staatoris ja ankrumähis rootoril, pöörlemisel ankrumähisesse indutseeritav vahelduvpinge alaldatakse ja seda kasutatakse generaatori ergutusmähiste toiteks. Staatiliste ergutussüsteemide puhul puudub ergutusgeneraator ja seetõttu puuduvad ka liikuvad osad. Ergutusvoolu saadakse pinget alandava trafo kaudu kas elektrisüsteemist või otse generaatori klemmidelt, saadav madalpingeline vahelduvvool alaldatakse ja selle ergutusmähisele edastamisele tuleb kasutada kontaktrõngaid ja harju [2], mis tähendab, et süsteem ei ole siiski täielikult hooldevaba.

1.3 Nõuded pingeregulaatoritele

Eestis sätestab nõuded generaatorite ja nende ergutussüsteemidele Vabariigi Valitsuse määrus nr.184 „Võrgueeskiri“. Kehtiva Võrgueeskirja [6] kohaselt moodustavad pingereguleerimissüsteemi lisaks pingeregulaatorile võnkesummuti, staatori- ja rootorivoolu piirajad ning stabilisaator. Samuti sätestab määrus generaatori, erguti ja pingeregulaatori suhtes erinevaid nõudeid. Harjadeta erguti korral on nõutav lagipinge väärtus vähemalt 1,6 kordne generaatori ergutuspinge nimiväärtus ning lagipinge minimaalne kestvusaeg on määruse kohaselt 10 sekundit. Viimane peab kehtima ka lähestikuste lühiste vältel ning vajaduse korral peab olema võimalik lülitada süsteem käsijuhtimisele. Generaatoritele tuleb elektrisüsteemi ja generaatori vaheliste võnkumiste summutamiseks paigaldada nii väljalülitamise kui piiramise võimalusega võnkesummuti. Staatori ja rootorivoolu piirajad peavad määruse kohaselt olema pöördvõrdelise ajakarakteristikuga, mis tähendab, et generaatorit on võimalik lühiajaliselt üle koormata. Pingeregulaatori töö eeldatakse olema üldjuhul automaatne, erisuguste reguleerimissüsteemide korral tuleb need kooskõlastada võrguvaldajaga.

1.4 Ergutusregulaator Basler DECS-250

Ergutusregulaator Basler DECS-250 on mõeldud sünkroongeneraatorite ja -mootorite ergutuse reguleerimiseks. Regulaator kontrollib masina väljundeid läbi ergutuseks kasutatava alalisvoolu muutmise. Masinale antav ergutus on määratud generaatori voolu ja pinge mõõdetud väärtustega ja etteantud reguleerimisättega [7]. Käesolevas punktis vaadeldakse eelkõige neid DECS-250 funktsioone, mida reguleerib kehtiv Võrgueeskiri ning põhjendatakse nende vajalikkust erinevate allikate põhjal. Samuti tuuakse välja mõned funktsioonid, mida ei ole seadusandluses nõutud, kuid mida on antud seadme puhul siiski võimalik kasutada.

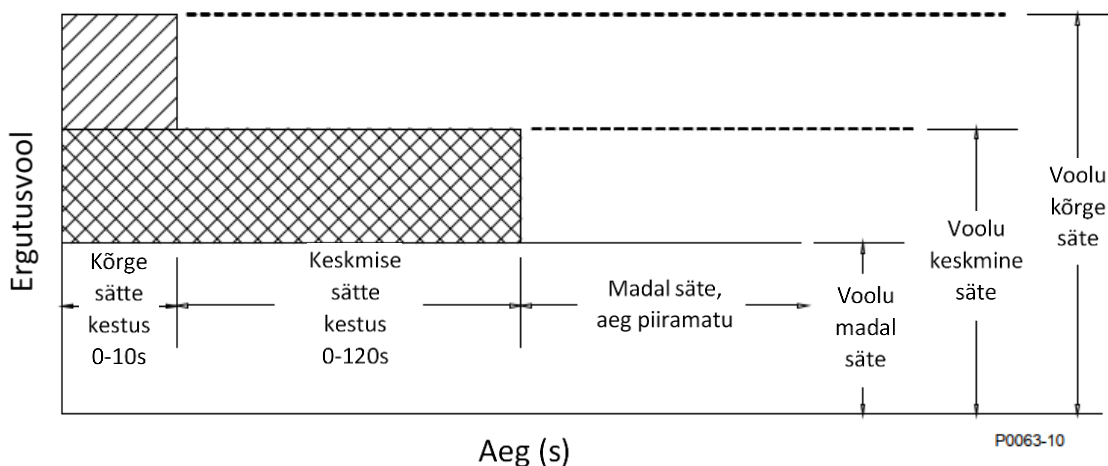
1.5 Basler DECS-250 funktsionaalsus

Basler DECS-250 näol on tegemist küllaltki mitmekülgse seadmega, mis lisaks ergutusvoolu reguleerimisele pakub ka erinevaid releekaitsevõimalusi ning võimaldab koos vastavate mõõtemuunduritega saada generaatori ja võrgu kohta erinevaid mõõteandmeid. Käesolevas töös vaadeldakse ergutusregulaatori tööd automaatse pingeregulaatori režiimis; antud seadmel on ka mitmeid teisi reguleerimisalgoritme: FCR – ergutusvoolu järgi reguleerimine, FVR – ergutuspinge järgi reguleerimine, VAR – generaatori reaktiivvõimuse järgi reguleerimine ning PF – võimsusteguri järgi reguleerimine [7]. Kõikide reguleerimisvõimaluste puhul tuleb määrata reguleerimisvahemiku piirid, mis seatakse protsendina generaatori nimiaandmetest. Lisaks sellele on määratud, kui lühikese aja jooksul saab generaator liikuda ühest äärmuslikust väärtusest teiseni. Automaatne pinge reguleerimine toimib PID regulaatori abil [7]. Regulaatorile on võimalik valida kaks komplekti erinevaid seadeid – näiteks ühed kasutamiseks koos elektrisüsteemi stabilisaatoriga ja teised kasutamiseks ilma selleta. Seadme mälust on võimalik valida generaatori ja erguti ajakonstantide põhjal eelseadistatud regulaatori parameetreid, neid väärtusi on kokku 20. Aja ja kütuse kokkuhoiduks generaatori käiku võtmisel on võimalik kasutada ka pingeregulaatori automaatseadistust, mis aitab pingeregulaatori sätteid leida läbi erinevate algoritmide. [7] Regulaatori parimaks toimimiseks on võimalik regulaatori parameetrite kordajaid ka käsitsi valida või muuta. Lisaks sellele on saab kasutada kalkulaatorit, mis arvutab generaatori nimiaandmete põhjal välja PID regulaatori seadistused.

Mõnel juhul asetseb generaator toidetavast tarbimiskeskusest kaugemal – sellisel juhul tuleb pinge reguleerimisel arvesse võtta ka generaatorit võrgu sõlmega ühendaval liinil tekkivat pingelangu. Pingelang liinil määratakse protsendina generaatori nimipingest. Pingelangu arvutamiseks vajalikud valemid on toodud seadme kasutusjuhendis [7].

1.5.1 Staatori- ja rotorivoolu piirajad

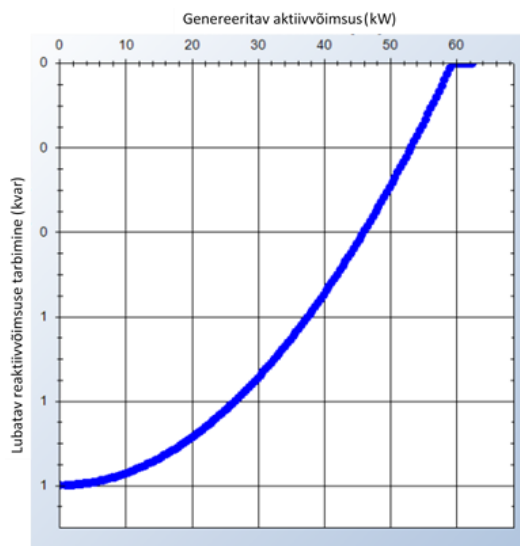
Generaatori kaitse poolelt on olulisteks funktsioonideks üle- ja alaergutuse piirajad. Olemuselt on need kaks piirajat vajalikud liigvoolude vältimiseks rotoris. Liiga suur ergutusvool põhjustab ergutusmähiste kuumenemist ning võib seeläbi kahjustada masinat. [2] Vastavalt Võrgueeskirjale peab rotorivoolu piiramine olema ajaga pöördvõrdeline [6]. DECS-250 üleergutuse piiraja võib olla kahe- või kolmeastmeline (Joonis 1.2). [7] Esimesest ehk madalaimast tasemest madalama ergutusvoolu puhul rele ei reageeri, sellises olekus võib generaator töötada piiramatult aja. Järgneb keskmine tase, mille puhul ületab ergutusvool pikaajalist lubatavat piiri, lubatav ajavahemik selles olukorras töötamiseks on kuni 120 sekundit [7]. Keskmisest kõrgemal ergutusvoolu tasemel võib generaator töötada kuni 10 sekundit. Kui ergutusvool ületab kõrgemat taset, siis piiratakse see kohe kõrgeima lubatava tasemeni. [7]



Joonis 1.2. Generaatori üleergutuspiirajat illustreeriv joonis [7]

Kui kõrge sätte piirkonnas töötamise aeg on ületatud, siis vähendatakse ergutusvoolu keskmise tasemeni, samamoodi toimitakse keskmise ergutusvoolu piiraja sätte täitumisel. Sel juhul piiratakse ergutusvool madalama väärtuse juurde, millega töötamise aeg on piiramatult.

Alaergutuse piiramine on vajalik, kuna pideva alaergutusega töötades hakkab staatori raud kuumenema ning äärmuslik alaergutus võib viia sünkronismi kaotuseni. [2] Alaergutuse piiramine on määratud kõveraga (Joonis 1.3), mis määrab, kui palju reaktiivvõimsust on masin võimeline genereeritava aktiivvõimsuse juures tarbima. Nagu jooniselt nähtub, on generaatori reaktiivvõimsuse tarbimise võime pöördvõrdeline generaatori poolt toodetava reaktiivvõimsusega.



Joonis 1.3. Generaatori reaktiivvõimuse tarbimise võimekus sõltuvalt genereeritavast aktiivvõimusest [7]

Lisaks rootorivoolu piiramisele jälgib seade ka staatorivoolu. Staatorivoolu piirangud tulenevad võimsuskadudest staatorimähises, mida põhjustavad nii aktiiv- kui ka reaktiivvõimsus [2]. DECS-250-l on võimalik ka selle piiraja puhul määrata madal ja kõrge sätet – kõrget sätet ületades piiratakse staatori voolu momentaalselt, madalat sätet võib generaator ületada maksimaalselt ühe minuti jooksul. Madalamast sättest väiksema vooluga on generaatori tööaeg piiramatult [7]. Nende andmete põhjal võib järeldada, et DECS-250 piirajate seadistamisvõimalused on kooskõlas Eesti seadusandlusega.

1.5.2 Elektrisüsteemi stabilisaator

Töös kasutatava pingeregulaatori puhul kasutatakse elektrisüsteemi stabilisaatorit, mis vastab IEEE standardi 421.5 järgi mudelile PSS2A [8]. Elektrisüsteemi stabilisaatori ülesandeks on muuta generaatori ergutust nii, et tekkinud elektriline moment pidurdaks rootori kiiruse võnkumist [2]. Sisuliselt suurendatakse generaatori rootori kiirendamise ajal elektrimasina koormust ning rootori aeglustamise ajal vähendatakse elektrilist koormust. Sellise regulaatori puuduseks on oht tekitada oma tööga generaatori võlli torsioonvõnkumisi [2]. Torsioonvõnkumised toimuvad generaatori võlli omavõnkesagedusel ning sumbuvad väga pika ajakonstandiga [2], võnkumine on võimalik generaatori võlli elastsuse tõttu. Oht, et ergutusregulaator tekitab torsioonvõnkumisi, minimeeritakse lisades stabilisaatorile filtri, mis vähendab kindlaksmääratud sagedusel stabilisaatori väljundsignaali amplituudi [7].

1.5.3 Automaatne sünkronisaator

Antud töös kirjeldatud DECS-250 omab ka automaatse sünkronisaatori kasutamise võimalust. Automaatse sünkronisaatori tööpõhimõte seisneb generaatori ja võrgupingete faaside kokkulangemise ennustamises [9]. Sünkronisaatori kasutamiseks on vaja väga täpselt teada generaatori võimsuslüli sulgumisaega, vastasel korral ei sulgu lüliti õigel ajahetkel ning seetõttu tekitab elektrisüsteemi soovimatu häiringu. Automaatse sünkronisaatori kasutamiseks DECS-250'l on vaja seadmega ühendada lisaks generaatori klemmipinget mõõtvatele pingetrafodele ka alajaama lattidel pinget mõõtvad pingetrafo [7]. Sünkronisaatorit kasutades saab arvesse võtta ka pinget tõstva või langetava trafo ülekandesuhet ning trafo lülitusgrupist tulenevat faasinihet generaatori ja alajaama pingevahel. Lisafunktsioonidena kaasnevad veel alajaama lattide seisukorra kontroll ja võimsuslüli toimimise kontroll. Kui lüliti ei ole määratud viiteaja jooksul rakendunud, siis annab seade signaali võimsuslüli rikke kohta. [7]

Enne generaatori võrguga ühendamist kontrollitakse generaatori pingestabiilsust. Ettemääratud ajavahemiku jooksul ei tohi esineda üle- ega alapinget ning ettenähtust kõrgemat ega ka madalamat sagedust. Generaatorit võrguga ühendav võimsuslüli ei sulgu, kui kõik neist tingimustest ei ole täidetud. Samasugune kontroll toimub ka alajaama lattidel, millega generaatorit ühendada soovitakse. Kui stabiilsuskriteeriumid ei ole piisava aja jooksul täidetud, siis annab seade signaali generaatori või võrgu rikke kohta. [7] Automaatse sünkronisaatori funktsioon on õige häälestuse korral väga kasulik abivahend, mis vähendab lülituste ajal inimlike eksimuste tekkimise ohtu.

1.5.4 Releekaitsefunktsioonid ja mõõteseadmetega ühilduvus

Releekaitse poole pealt pakub DECS-250 võimalust kasutada generaatori klemmipinget, sageduse, võimsuse, ergutuse parameetrite, võllil oleva alaldi diodide ja regulaatori toite kaotuse kontrolli [7]. Kõikide kaitsete puhul saab kasutaja määrata kaks sättegruppide, mis võimaldab kaitsete koordineerimist teiste võrgus olevate kaitseseadmetega.

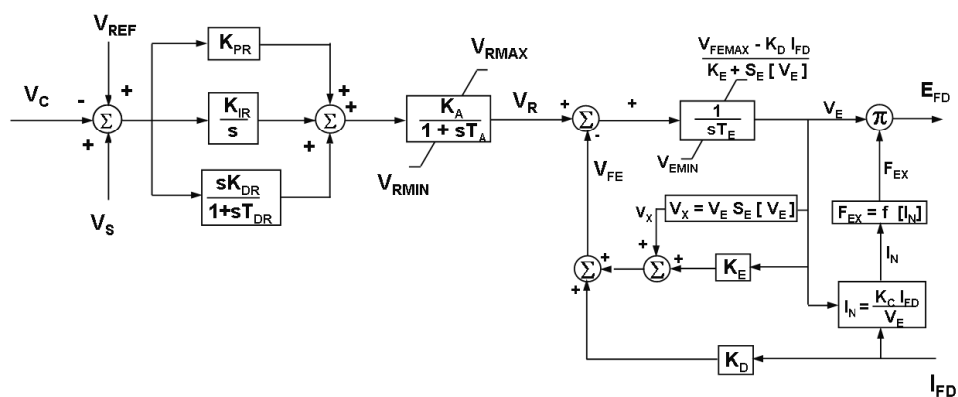
Pingekaitsetest on kasutatavad üle- ja alapingekaitse ning samuti kaitse, mis kontrollib mõõtetulemuste olemasolu. Kõikidel kaitsefunktsioonidel on võimalik valida sätet ning viiteaega. Sageuse kaitse reageerivad analoogselt pingekaitsetele liiga kõrgele ja liiga madalale sagedusele. [7] Võimsusega seotud kaitsetest kontrollitakse võimsusvoo suunda [7], et vältida olukorda, kus näiteks turbiini auruvarustuse katkemisel hakkab generaator toimima mootorina.

Ergutit kaitsevad ülepinge- ja liigvoolukaitsed, voolukaitsed saab panna toimiva vastavalt ajaga pöörvõrdelisele kõverale ja kindlast väärtusest voolulõikena [7]. Loomulikult saab kasutada ka mõlemat varianti korraga.

DECS-250 mõõdab generaatori töötamise ajal generaatori voolu, pinget ja sagedust. Voolu ja pinget puhul mõõdetakse nii faasori pikkust kui ka nurka, pinget ja sagedust mõõdetakse ka alajaama lattidel. Võimuse poolelt mõõdetakse nii genereeritavat aktiivvõimsust kui ka reaktiivvõimsust, ühtlasi arvutatakse ka seadme võimsustegur. Lisaks sellele on võimalik mõõta toodetud aktiiv-, reaktiiv- ja näivenergiat. [7] Mõõtetrafode ühendamisel on võimalik pingetrafode sekundaar-pingena kasutada kuni 600 V pinget ning voolutrafode puhul kuni 5 A sekundaarvoolu. Seade mõõdab sisemiste ahelate kaudu ka ergutuspinget ja -voolu. Elektrisüsteemi stabilisaatorit omava mudeli puhul on võimalik mõõta ka päri- ja vastujärgnevusvoolu ja -pinge komponente. DECS-250 on võimeline salvestama ka häiringuid – talletada saab kuue erineva parameetri ostsillogrammid häiringu hetkest. Seejuures saab kasutaja valida, milline protsess salvestusfunktsiooni käivitab. Mõõteandmeid on seadmest võimalik edastada teistele samasse võrku ühendatud seadmetele kasutades Modbus RTU protokoll, mitme generaatori regulaatorite võrku ühendamisel on võimalik selliselt lahendada näiteks nendevaheline reaktiivvõimsuse tootmise jaotumine. [7]

1.6 Mudel AC8B

Vastavalt IEEE standardile 421.5 on antud lõputöös kasutatava ergutusregulaatori talitlemine väiksemate elektrisüsteemi häiringute korral modelleeritav ergutussüsteemi matemaatilise mudeliga AC8B. Vastavalt standardile sobib antud mudel kirjeldamiseks harjavabasid digitaalsete pingeregulaatoritega süsteeme ning pöörlevate alalisvooluergutitega süsteeme, kui seada mudelis parameetrid K_c ja K_d võrdseks nulliga. Standardis kirjeldatud mudelid on kasutatavad sageduse kuni viie protsendilisel hälbimisel. [8] Mudeli loogikaskeem on toodud alljärgneval joonisel (Joonis 1.4.).



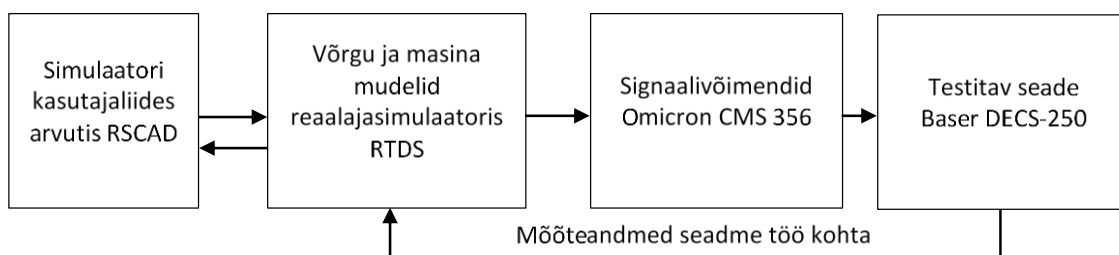
Joonis 1.4. AC8B ergutussüsteemi mudeli plokkskeem [8]

Mudeli tähtsaimateks sisenditeks on generaatori klemmipinge V_c ja generaatori nii-öelda soovitatav klemmipinge V_{ref} . Need suuruste vahe tähistab pingeviga. Sellele liidetakse tavaolukorras veel summeeritud signaal V_s , mis kujutab endast elektrisüsteemi stabilisaatori või mõne toiminud piiraja, näiteks ala- ja üleergutuse piirajate ning staatorivoolu piiraja signaale. Järgmiseks

saadetakse summeeritud signaal PID regulaatorile, mille ülesandeks on võimalikult kiiresti ja väikese veaga likvideerida pingeerinevus. Järgneb lüli, mis võtab arvesse automaatse pingeregulaatori ajakonstanti T_A ja pingeregulaatori võimendustegurit K_A . Pingeregulaatori väljundsignaaliks on V_R , mis on piiratud minimaalse ja maksimaalse väärtusega vastavalt V_{RMIN} ja V_{RMAX} . Järgnevast summerivast lülist algav mudeli osa võtab arvesse ergutis endas toimuvaid erinevaid protsesse. Näiteks võetakse siin arvesse erguti küllastumist S_E , erguti võimendustegurit K_E ja alaldi koormamise tegurit K_C . [8] Mõistagi sõltuvad tegurid, mis on seotud erguti küllastumise ja alaldi koormamisega, nii ergutile rakendatud pingest V_R ning läbi selle ka ergutusmähises voolavast voolust I_{FD} . Loogikaskeemi väljundiks on E_{FD} ehk erguti väljundpinge. [8]

1.7 Katsestendi ülesehitusest ja praktilisest vajadusest

Katsestend on idee poolest HIL (*Hardware-in-the-loop*) simulatsiooni vahend. See tähendab, et osa kontrollisüsteemi komponentidest on riistvaralised, ning ülejäänud elektrisüsteemi osad simuleeritakse reaalajas. [10] Antud katsestendi puhul on riistvaralise osana esindatud digitaalne ergutusregulaator DECS-250 ja ülejäänud seadmed ehk sünkroongeneraator ja elektrivõrk simuleeritakse reaalajasimulaatoris RTDS. Katsestendi põhimõtteskeem on kujutatud alltoodud joonisel (Joonis 1.5 Joonis 3.5). HIL simulatsiooni eelisteks on võimalus kontrollida riist- ja tarkvara toimimist, ilma selleks reaalseid protsesse läbi viimata. [10] Käesoleva töö puhul kaotab reaalajasimulatsioonide kasutamine näiteks vajaduse tegeliku sünkroonmasina käitamiseks ergutusregulaatori tööpõhimõtete uurimisel.



Joonis 1.5. Katsestendi põhimõtteskeem

Ülaltoodud joonisel kujutatud katsestendi esialgse põhimõtteskeemi kohaselt simuleeritakse elektrisüsteemi ja uuritavat generaatorit reaalajasimulaatoris ning info võrgu ja generaatoriga toimuva kohta saadetakse edasi signaalivõimenditele, mis omakorda võimendavad selle uuritavale katseseadmele korrektselt loetavateks pinge ja vooluandmeteks. Saadud andmete põhjal otsustab uuritav ergutusregulaator, millise pingega ja vooluga peaks ergutit toitma. Erguti asemel kasutatavalt takistuselt mõõdetakse ergutuspinge ja voolu andmed, mis saadetakse tagasi reaalajasimulaatorisse. Simulaatorisse jõudnud andmeid on võimalik salvestada ja uurida kasutades tarkvara RSCAD. Vajadusel on võimalik koostada ka erinevaid graafikuid, mille abil võrrelda

saadud andmeid matemaatilise mudeli omadega. Programmi abil toimub ka erinevate katsetssenaariumide käivitamine ja lõpetamine. HIL katsetuste abil on võimalik panna riistvaraline seade proovile erinevates ekstreemsetes olukordades, mida seadme reaalses paigalduskohas oleks raske täide viia. Näiteks toimimine äärmuslikel temperatuuridel, erinevate süsteemihäiringute ning kaitseseadmete rikete korral. Katsetada saab süsteemi seisundeid, mis tegelikkuses oleksid ohtlikud kas kontrollitavale seadmele või tervele süsteemile.

Simulatsioonide väga suureks plussiks on, et katseid on võimalik samades tingimustes korrata, samas kui tegeliku süsteemi olek on pidevas muutumises ega võimalda seeläbi praktiliselt korduvate katsetingimuste loomist. Teise positiivse küljena saab välja tuua asjaolu, et taoliste katsete abil on võimalik kiirendada aeglaste protsessidega seotud juhtseadmete töösse võtmist – reaalajasimulaatoris protsesse kiiremini läbi mängides saab näiteks tavaliselt ühe kuu jooksul toimuvad sündmused realiseerida päeva jooksul. [10]

Sarnased simulatsioonid on levinud erinevate juhtsüsteemide töö kontrollimiseks, peamiselt sellistes valdkondades, kus reaalsete katsetuste teostamine oleks kas kulukas või koguni ohtlik. Headeks näideteks selliste simulatsioonide kasutamisest on näiteks autode pidurisüsteemide arendus [11] või laeva juhtimissüsteemide arendus ja testimine [12]. Tallinna Tehnikaülikoolis on varasemalt reaalajasimulaatoriga uuritud näiteks erinevate distantskaitsereleede ja faasimõõteseadmete (PMU) töötamist ning võrreldud nende toimimist reaalajasimulaatoris modelleeritud kaitse- mõõteseadmetega.

1.8 Sarnased uurimused

Sarnaseid uurimusi on praegu veel vähe – peamiselt on selliste probleemidega tegeletud viimasel kahel aastakümnel, mil elektrisüsteemis on kasutusele võetud rohkelt digitaalseid seadmeid. Nimelt on digitaalsete juhtseadmete kasutuselevõtuga mõnevõrra keerukamaks muutunud ka generaatorite käiku võtmine [13]. Enamikes ergutusregulaatorites on võimalik valida erinevate juhtimisstrateegiatega vahel ning seega nõuab regulaatori häälestamine paljude erinevate parameetrite täpset määramist vältimaks erinevate kaitsefunktsioonide konflikte ning tagamaks pingeregulaatori võimalikult kiire ja täpne töö. [13]

Selliseid katseid ei saa ellu viia reaalse sünkroongeneraatoriga või -kompensaatoriga, kuna see võib lõppeda masina kahjustamisega ning suuremate häiringute tekitamine võib olla ohtlik ka teistele võrku ühendatud seadmetele. [14] Seetõttu tulebki kasutada katseseadmeid, kuhu ühendatakse küll reaalne ergutusregulaator, kuid nii elektrimasin kui ka ülejäänud võrk on simuleeritud varem välja töötatud matemaatiliste mudelite abil. Järgnevalt antakse ülevaade mõnest sarnase sisuga ja uurimusest ning sarnase ülesehitusega katseseadmete kasutusest.

Üheks sarnastest uurimustöödest on Taani Tehnikaülikooli poolt avaldatud uurimus sünkroon-kompensaatori automaatse pingeregulaatori katsetamisest sarnases stendis. Katsetatav ergutus-regulaator vastas IEEE standardi 425.1 järgi mudelile AC7B (mitte AC8B nagu käesolevas töös käsitletav ergutusregulaator). Sarnaselt lõputöö ülesande püstitusele on artikli autorite väitel pingeregulaatori automaatreguleerimise seadmed tänapäevases elektrisüsteemis üha olulisemad. Süsteemides kasutatakse järjest enam konvertereid sisaldavaid tootmiseseadmeid, millest tulenevalt elektrisüsteemi inerts väheneb. Süsteemi käitumine dünaamiliste protsesside toimimisel muutub [15], pannes proovile nii tootmiseseadmete kui ka nende juhtimissüsteemide töökindluse ja funktsionaalsuse. Kuna tootmiseseadmete katsetamine tegelikus elektrivõrgus on kulukas ja ebaefektiivne, siis testitakse pingeregulaatorite ja elektrisüsteemi stabilisaatorite toimimist nii väiksemate kui ka suuremate dünaamilist stabiilsust ohustavate häiringute korral pigem katsestendis. [15]

Käesolevas töös käsitletavaga sarnaseid katsestende peetakse efektiivseks abinõuks, testimaks ergutuskontrollerite funktsionaalsust ja kontrollimaks selle toimetulekut erinevate süsteemi häiringutega. [14] Testida saab riistvara tööd nii käivituse ajal, ala- ning üleergutuse režiimis kui ka reaktsiooni pingemõõtmise andmete kaotamisele ja võrgu erinevatele pingemuutustele. [15] Ühtlasi on võimalik vaadelda regulaatori kõikide kaitsefunktsioonide toimimist ning kontrollida erinevate kaitsetsätete korrektsust [14].

Taani Tehnikaülikooli avaldatud artiklis [15] kirjeldatud katsetuste tulemustest saab välja tuua, et simuleeritud AC7B mudeli ja testitud pingeregulaatori käitumine vaadeldud olukordades oli väga sarnane. Olulise tulemusena oli reaalne pingeregulaator kõikides katsetes simuleeritud regulaatorist aeglasem. Selle võimaliku põhjusena toovad artikli autorid välja pingeregulaatori ja simulatsiooni vahel mõõtesignaali edastamiseks kuluva aja. Positiivse poole pealt suutis ala- ja üleergutuse tingimustes reaalse regulaatoriga mudel vastavalt tarbida või toota rohkem reaktiivvõimsust kui seda suutis simuleeritud regulaatoriga mudel. [15]

Sarnase probleemiga on tegelenud ka Vene Föderatsiooni teadlased. Alates 2000. aastate algusest, kui Venemaa ühendenergiatsüsteemis algas vananenud analoogseadmete väljavahetamine, on kasutusele võetud palju erinevaid automaatseid pingeregulaatoreid ning elektrisüsteemi stabilisaatoreid. Seetõttu tekkis süsteemioperaatoril vajadus luua standard, millega määratakse nõuded kasutusse lubatavatele seadmetele. Varasemalt on seadmete võrku lubamisel toetunud peamiselt seame tootja poolt saadud informatsioonile – struktuurskeemidele ja matemaatilistele mudelitele. Süsteemioperaatoril oli vaja leida meetod, millega saaks kontrollida seadmete vastavust nende tootjate poolt välja pakutavatele matemaatilistele mudelitele. [16] Töös pakutakse eesmärgi saavutamiseks välja antud lõputöös loodavale katsestendile sarnane testseade. Selle abil

salvestatakse pingeregulaatorite ja elektrisüsteemi stabilisaatoritega ühendatud modelleeritud generaatorite kohta nende klemmipinge amplituudi ja faasinurga sageduskarakteristikud. [16]

Töö [16] autorid järeldavad, et tegelike regulaatorite sageduskarakteristikud võivad suhteliselt suurel määral erineda nende modelleerimiseks kasutatavatest matemaatilistest mudelitest ning leiavad, et säärane katseseade annab hea võimaluse kontrollida juba võrku lubatud regulaatoreid. Samuti tuuakse välja, et vajadusel saab mõõtetulemuste alusel nende matemaatilisi mudeleid täiustada, et need vastaksid tegelikkusele.

Rootsi ja Norra teadlaste poolt koostatud teadustöös [17] on uuritud ABB ergutusregulaatori Unitrol 1020 töötamist muutuva aktiiv- ja reaktiivkoormuse tingimustes. Antud uurimuses simuleeritakse elektrivõrk ja uuritav generaator reaajasimulaatoris OPAL-RT. Seejuures uuritakse regulaatori tööd kahes erinevas juhtimisrežiimis, esimeseks neist on sarnaselt lõputöös kasutatavale automaatse pingeregulaatori režiim, teiseks aga ergutusvoolu käsitsi reguleerimine, mida käesolevas lõputöös ei vaadelda.

Samas uurimuses vaadeldakse täpsemalt ka ergutusregulaatorisse sisseehitatud elektrisüsteemi stabilisaatori mudelit. Stabilisaator vastab IEEE standardi 421.5 järgi PSS 2A/2B mudelile [17], olles seega väga sarnane lõputöös käsitletavale DECS-250 stabilisaatori mudelile. Kirjeldatakse stabilisaatori töö juhtimiseks valitud parameetreid ja hinnatakse stabilisaatori töö edukust teostades modelleeritud elektrivõrgus lühiskatseid, mille kestus on 160 ms kahes olukorras: olekutes, kus Unitrol 1020 stabilisaator on vastavalt välja või sisse lülitatud.

Väljalülitatud stabilisaatoriga tekkis lühiskatse järel elektrivõrgu mudelis piirkondade vaheline võnkumine sagedusega 0,64 Hz. Sisselülitatud stabilisaatoriahela puhul piirkondade vahelist võnkumist ei tekkinud, kõik generaatorid püsisid sünkronismis ning pärast lühise lõppu taastus kiirelt normaalne tööolukord. Artikli autorid järeldavad, et antud ergutusregulaator tuleb oma tööga hästi toime, hoides automaatse pingeregulaatori režiimis ettenähtud pinget ning elektrisüsteemi stabilisaator suudab rahuldavalt summutada piirkondade vahelisi võnkumisi. [17] ABB Unitrol 1020 ergutusregulaatoriga on võimalik kasutada ka eraldiseisvaid elektrisüsteemi stabilisaatoreid – samad autorid on andnud välja ka uurimuse, mille käigus vaadeldakse ergutusregulaatori tööd koos erinevate reaajasimulaatori simuleeritud elektrisüsteemi stabilisaatorite mudelitega. [18]

Sarnase eesmärgiga katseid, olgugi, et elektrisüsteemis kasutatavatest erineva generaatori simuleerimisega on tegelenud ka Hiina teadlased. Uurimuses [19] modelleeritakse lennutööstuse jaoks loodud generaatorit OPAL reaajasimulaatoris. Simulaator on ühendatud automaatse pingeregulaatoriga ja elektrimasina ergutit simuleeritakse reostaadi ja induktiivpooli abil. [19]

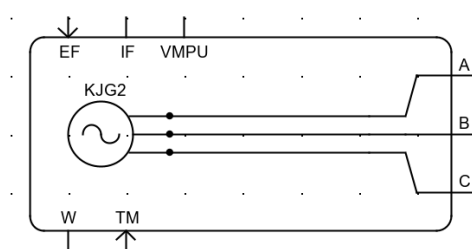
Esmalt on käsitletud elektrimasina töö muutumist erinevate pingeregulaatori PID regulaatori väärtuste juures. Kirjeldatud on kahte komplekti võimendustegureid ja esitletud katsetulemusi mõlemaga, ühel juhul on generaatori väljundpinge stabiilne, teisel juhul võnkuv [19]. Veel uuritakse, kuidas muutub konstantse generaatori koormuse juures regulaatori toiteks antava ergutuspinge väärtuse muutumisel ergutisse saadetava pulsilaiusmoduleeritud signaali töösükkel. Viimase katsena viiakse läbi generaatori koormuse hüppelise tõstmise ja langetamise katsed. Autorid leiavad, et HIL simulatsioonide kasutamisega on võimalik uurida pingeregulaatori reguleerimisvõimekust ja see annab hea võimaluse PID regulaatori võimendustegurite väärtuste täpsustamiseks. [19]

Ergutusregulaatori tööd on reaaliajasimulatsioonide abil uuritud paljudes erinevates riikides, alustades põhjamaadest ja lõpetades Hiina Rahvavabariigiga. Katsetatud on erinevaid pingeregulaatorite tüüpe, mille hulgas on nii programmeeritavatel loogikakontrolleritel põhinevaid seadmeid kui ka keerukamaid tööstuslikuks kasutamiseks loodud seadmeid, mis sisaldavad näiteks elektrisüsteemi stabilisaatorit. See annab töö autorile julgustust, et ettevõetud ülesanne on teostatav. Samas ei õnnestunud autoril leida säärase seadmete konfiguratsiooniga ning sama tootja ergutusregulaatorit hõlmanud katsestendi kohta käivaid uurimusi. Seega võib järeldada, et loodav katsestend on uuenduslik ja loodetavasti avab Tallinna Tehnikaülikooli tudengitele uusi õppimisvõimalusi.

Üks trafoalajaamadest seob 35 kV võrgu 6 kV võrguga läbi kahe 7,5 MVA võimsusega trafo. Sellesse alajaama on ühendatud lisaks elektritarbijatele ka käesolevas töös uuritav generaator. Teine trafoalajaam ühendab 35 kV võrgu 110 kV võrguga. Sellesse alajaama on paigaldatud kaks kolme-mähiselist 115 / 38,5 / 6,6 kV trafot võimsusega 40 MVA. Teistes alajaamades on elektrivõrguga ühendatud üksnes koormused. Ülejäänud 110 kV elektrisüsteem on mudelis kujutatud 110 kV alajaama lattidega ühendatud ekvivalentse allika mudelina. Et vaadelda generaatori töötamist võrgu rikete korral, on 110 kV alajaama lattidega paralleelselt võrku kujutava ekvivalentse allikaga ühendatud ka lühiseharu, millega saab simuleerida erineva ajalise kestusega ühe-, kahe- ja kolmefaasilisi lühiseid.

2.2 Ergutusregulaatori ja generaatori matemaatiline mudel

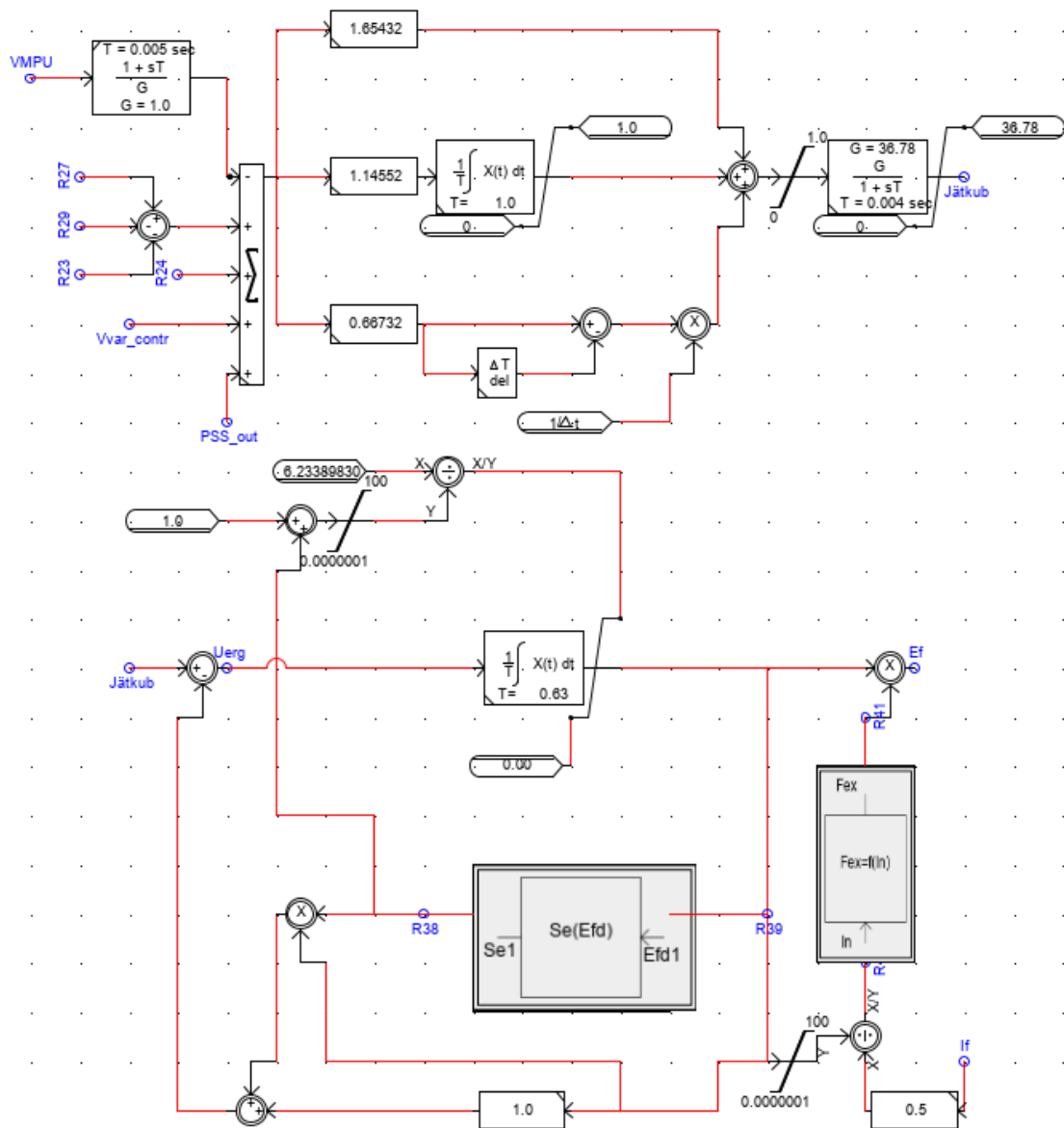
Generaatori puhul on kasutatud lihtsustatud sünkroonmasina mudelit (Joonis 2.2), mille sisenditeks on turbiinilt saadav moment (TM) ja ergutilt saadav ergutuspinge (EF). Masina väljunditeks on klemmipinge suhtühikutes (VMPU), masina nurkkiirus (W) ning ergutusmähises tekkiv vool (IF).



Joonis 2.2. Sünkroongeneraatori mudeli graafiline kujutis programmist RSCAD

Generaatori mudeli juurde kuulub ka tema ergutussüsteemi mudel. Järgnevalt vaadeldakse programmis RSCAD kujutatud generaatori ergutusregulaatori mudelit (Joonis 2.3) standardis IEEE 421.5-2005 kirjeldatud mudeliga AC8B (Joonis 1.4).

Nagu järgnevalt joonistelt näha, on kasutatav mudel võrdne AC8B mudeliga, esinevad mõned lihtsustustest ja kompaktsemast graafilisest kujutamisest tulenevad erinevused. Mudeli sisenditeks on generaatori klemmipinge VMPU (Joonis 2.3), V_C (Joonis 1.4) ning pingeregulaatorile etteantav pinge väärtus V_{REF} (Joonis 1.4) ja R24 (Joonis 2.3). Ülejäänud RSCAD-i mudelis kujutatud summeeriva lüli sisendid kujutavad endast erinevate häiresignaali – üle- ja alaergutuspiiraja või alasageduspiiraja rakendumist. Samasse summeerivasse lülisse on veel ühendatud elektrisüsteemi stabilisaatori väljundsignaal ning generaatori reaktiivvõimsuse tootmise või tarbimise piiraja ületamise indikatsioon.



Joonis 2.3. Generaatori ergutussüsteemi mudel programmis RSCAD

Standardis kujutatud mudeli loogikaskeemil on nende signaalide asemel kasutusel kombineeritud signaal V_s . [8] Summeerivale lüüli järgneb loogikaskeemil PID regulaator, mis määrab, kui kiiresti ning millise signaalikujuga muutub pinge regulaatori väljundis, kui toimub pingemuutus regulaatori sisendis. Heal PID regulaatoril on kolm eesmärki [21]:

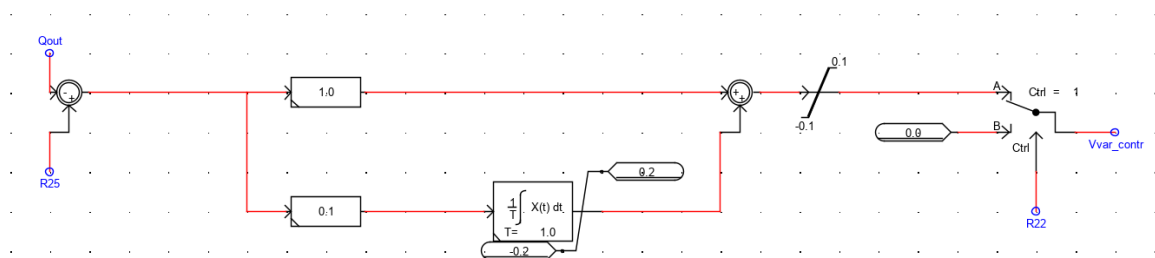
1. minimeerida frondi kestust, ehk reageerida sisendi muutusele võimalikult kiiresti;
2. minimeerida ülevõnget, ehk väljundsignaali nõutava väärtuse ületamist reguleerimisprotsessi käigus;
3. minimeerida siirdeprotsessi kestust, ehk perioodi, mille jooksul väljundsignaali väärtus jõuab ja jääb stabiilselt kahe protsendise erinevuse piiresse lõppväärtusest.

Antud generaatori puhul on sobivateks PID regulaatori võimendusteguriteks kasutatud proportsionaalses lülis 1,65432; integraalses lülis 1,14552 ja derivatiivses lülis 0,66732. Järgmisena võetakse nii standardi kui ka RSCAD-i mudeli puhul arvesse pingeregulaatoris endas tekkivat ajalist viidet, sT (Joonis 2.3) ja sT_A (Joonis 1.4) kasutatava mudeli puhul on regulaatoris tekkiv ajaline viide 0,004 sekundit. Järgmisena piiratakse regulaatori väljundpinge tema maksimaalsete lubatavate väärtuste vahele. Väljundpinge peab jääma antud mudelis 0 ja 36,78 sü vahele.

Järgnev osa mudelist, mis algab uue summeeriva lüliga, kujutab erguti enda matemaatilist mudelit. Selles võetakse muuhulgas arvesse ergutus endas tekkivat ajalist viidet, ning piiratakse ergutuspinget sobivate väärtusteni. Seejuures on maksimaalne ergutuspinge sõltuv ka erguti küllastusest ning ergutusmähises voolavast voolust.

2.3 Ergutusregulaatori piirajate matemaatilised mudelid

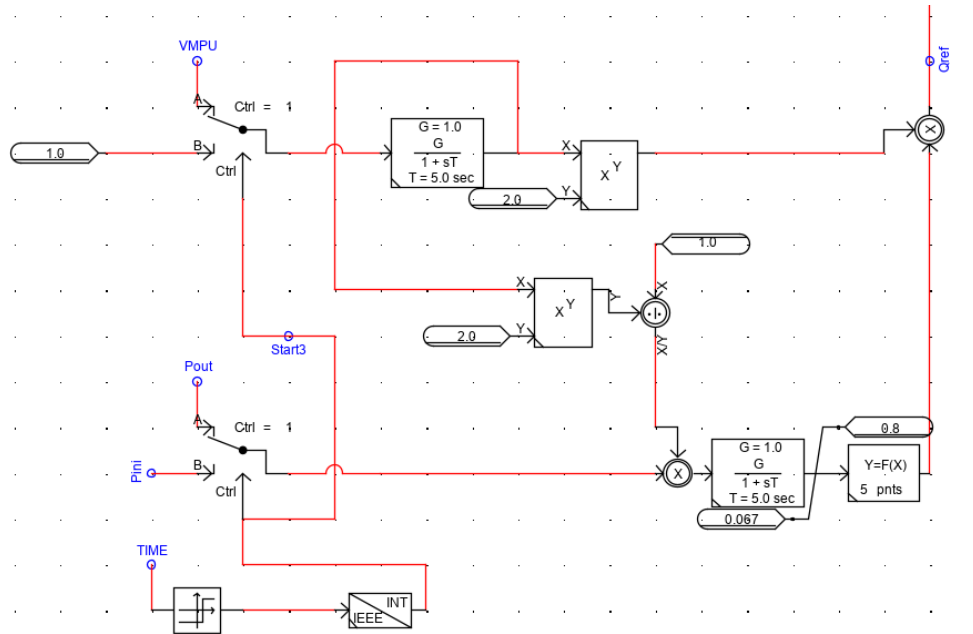
Pingeregulaatorite sisenditeks olevate piirajate ja kontrollifunktsioonide modelleerimisel on esimeseks vaadeldavaks piirajaks reaktiivvõimsuse tootmise või tarbimise kontroll (Joonis 2.4.). Nagu allolevalt jooniselt näha, on skeemi üheks sisendiks genereeritav reaktiivvõimsus (Q_{out}) ning teiseks sisendiks ($R25$) referentspinge. Skeem kujutab endast PI regulaatorit, mille integraali väärtused on piiratud altpoolt -0,2-ga ja ülevalt 0,2-ga. Kogu PI lüli maksimaalne väljundsignaali väärtus saab olla 0,1 sü ja minimaalne -0,1 sü. Kontrollisignaali $R22$ on kasutusel selleks, et mudelis reaktiivvõimsuse kontrolli ahelat sisse või välja lülitada. Väljundsignaaliks olev V_{var_contr} on omakorda sisendiks pingeregulaatori matemaatilisele mudelile (Joonis 2.3).



Joonis 2.4. Generaatori reaktiivvõimsuse tootmise kontroll programm RSCAD

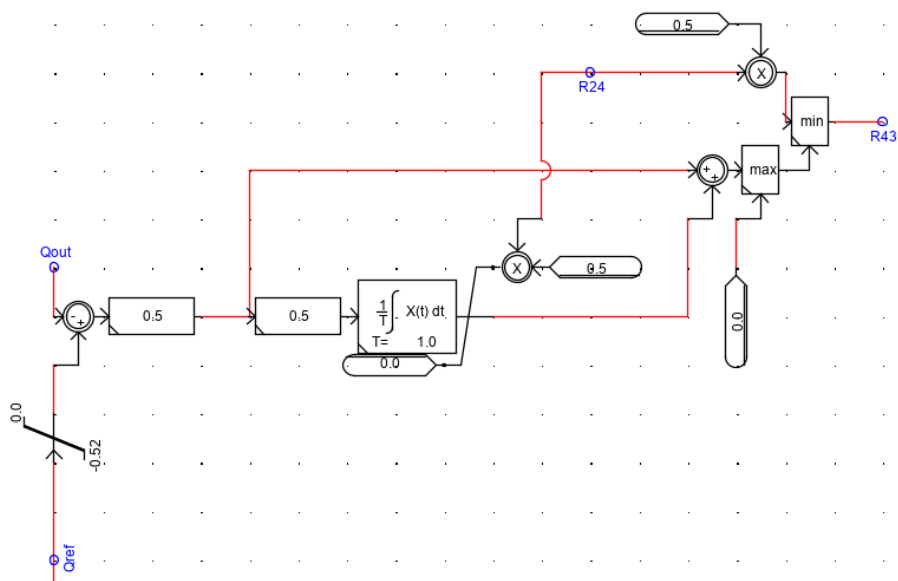
Teise piirajana vaadeldakse alaergutuspiiraja toimimist. Regulaatori loogikaskeem on toodud alljärgnevatel joonistel (Joonis 2.5 ja Joonis 2.6). Neist esimesel toodud loogikaskeemi abil leitakse generaatori klemmipinge (VMPU) ja hetkel toodetava aktiivvõimsuse (P_{out}) alusel maksimaalne võrgust tarbitava reaktiivvõimsuse väärtus. Viimane on üks tähtsaimaid lülisid selles skeemis - funktsiooniga $Y=F(X)$ määratakse kaheksa punktiga kõver, mis paneb paika erinevate generaatori aktiivvõimsuste juures generaatori reaktiivvõimsuse neelamise võime. Loogikaskeemi alguses

asuvad ümberlülitid on vajalikud simulatsiooni käivitamisel, vältimaks simulatsiooni alguses generaatori klemmipinge ning genereeritava võimsuse võrdumist nulliga. Ajutiselt antakse sisendsuuruste V_{MPU} ja P_{out} sisenditeks vastavalt 1 (klemmipinge nimiväärtus) ja P_{ini} (generaatori algvõimsus). Pärast simulatsiooni käivitamist muutuvad lülitite asendid sääraseks nagu neid on kujutatud alloleval joonisel (Joonis 2.5).



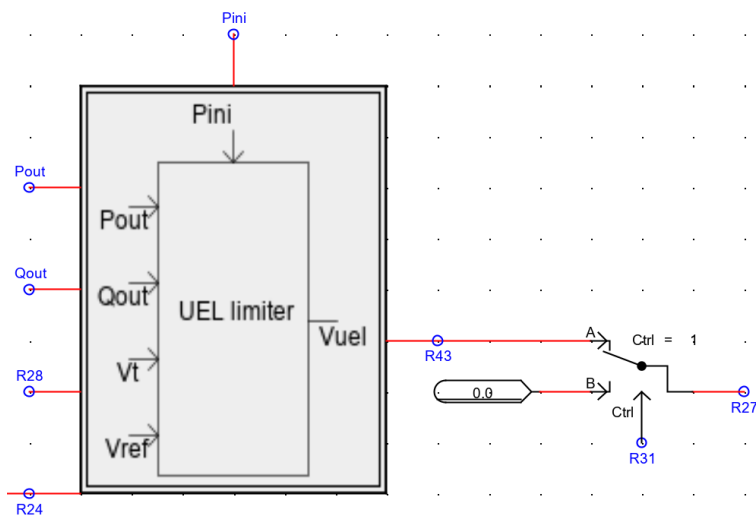
Joonis 2.5. Generaatori alaergutuse piiraja sisendsuuruse Q_{REF} leidmine programmis RSCAD

Eelneval joonisel kujutatud loogikaskeemil leitav Q_{REF} on sisendiks loogikaskeemile, mis on toodud alljärgneval joonisel (Joonis 2.6). Antud mudelis on määratud, et generaatori poolt tarbitav reaktiivvõimsus ei saa olla ühelgi juhul suurem, kui 0,52 sü.



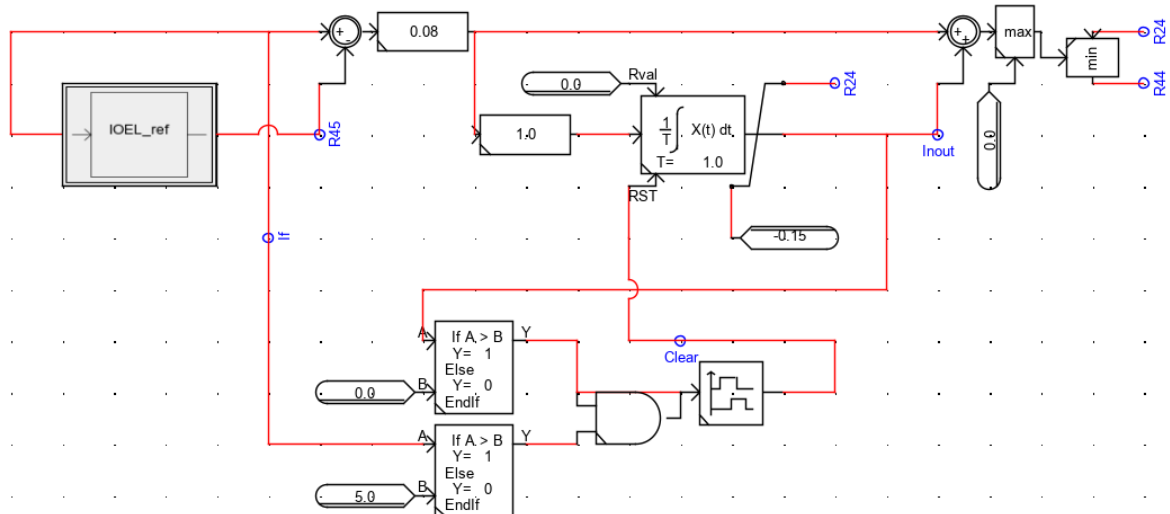
Joonis 2.6. Generaatori alaergutuse piiraja modelleerituna programmis RSCAD

Eeltoodud joonisel kujutatud skeemis kontrollitakse, kas realselt generaatori poolt tarbitav reaktiivvõimsus on suurem kui Q_{REF} kõveraga määratud reaktiivvõimsus konkreetse generaatori väljundvõimsuse ja klemmipinge juures. Kui tarbitav reaktiivvõimsus on lubatavast suurem, siis alustab vea likvideerimist ülaltoodud joonisel kujutatud PI regulaator. PI regulaatori väljundsignaal on piiratud 0,5 kordse referentspinge (R24) väärtuse ja nulli vahele. Kogu piiraja skeemi väljundiks olev signaal R43 on olemuselt sarnane signaaliga R27 (Joonis 2.7), ent alaergutuspiiraja väljundsignaali R43 on võimalik vastavalt vajadusele välja lülitada. Lülitamiseks kasutatakse signaali R31.



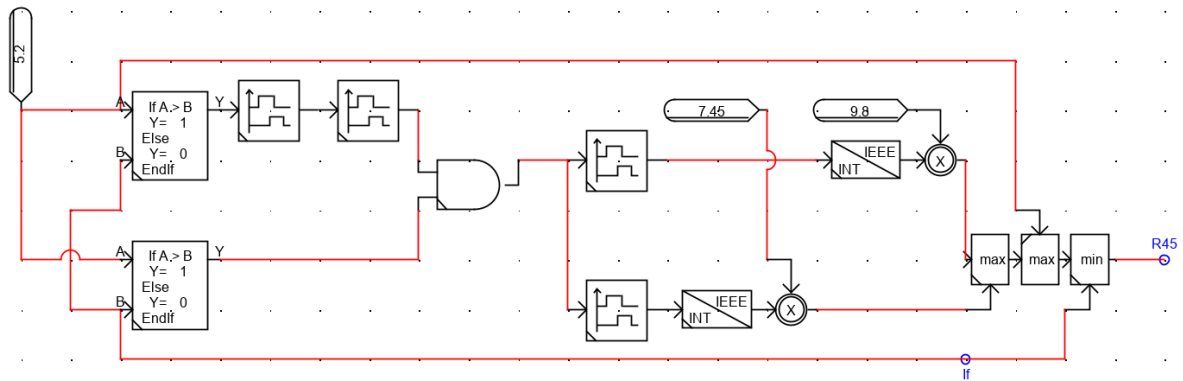
Joonis 2.7. Alaergutuspiiraja skeem

Lisaks generaatori alaergutuse piirajale on vajalik ka üleergutuse piiraja – vastavloogikaskeem on toodud alljärgnevalt (Joonis 2.8.). Jooniselt nähtub, et üleergutuspiiraja sisendiks olev ergutusvoolu (I_f) piiraja toimib astmeliselt, nagu kirjeldatud peatükis 1.5.1. Seetõttu on vajalik seadistada erinevate piiranguastmete voolu väärtused, mis on teostatud eraldi alamskeemina (I_{OEL_ref}).



Joonis 2.8. Üleergutuspiiraja loogikaskeem programmis RSCAD

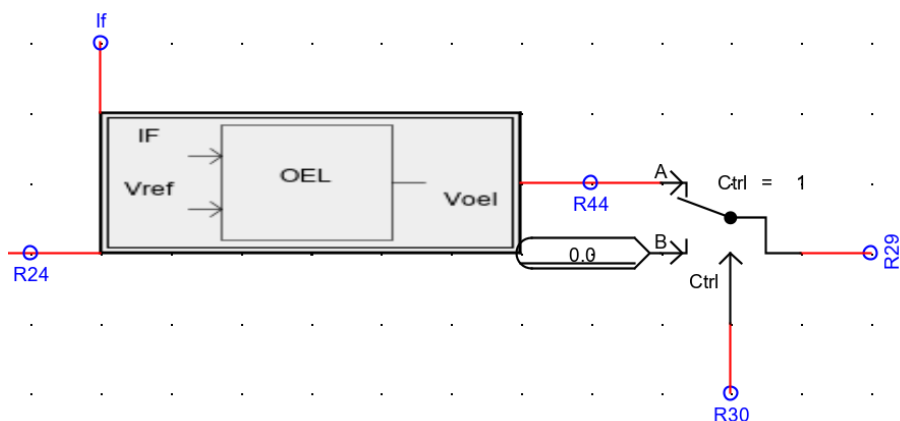
järgneval joonisel kujutatakse ergutusvoolu piiraja erinevate astmete seadistamise alamskeemi.



Joonis 2.9. Üleergutuspiiraja voolu referentsväärtuste seadmine programmis RSCAD

Jooniselt nähtub, et tavaolukorras on ergutusvool väiksem kui 5,2 A. See tähendab, et kuni 5,2 A vooluga võib erguti toimida piiramatu aja jooksul. Kui ergutusvool ületab 5,2 A, siis järgneb kaheastmeline piiramine. Voolu tugevusega kuni 9,8 A lubatakse ergutile maksimaalselt viieks sekundiks ning voolu tugevusega 7,45 A maksimaalselt kümneks sekundiks. Kümne sekundise perioodi täitumisel piiratakse ergutusvool 5,2 A-ni. Kui ergutusvool langeb alla 5,2 A, siis algolukorra taastumiseks kulub 3 sekundit. See tähendab, et enne kolme sekundi möödumist ergutusvool uuesti 5,2 amprit ületada ei saa.

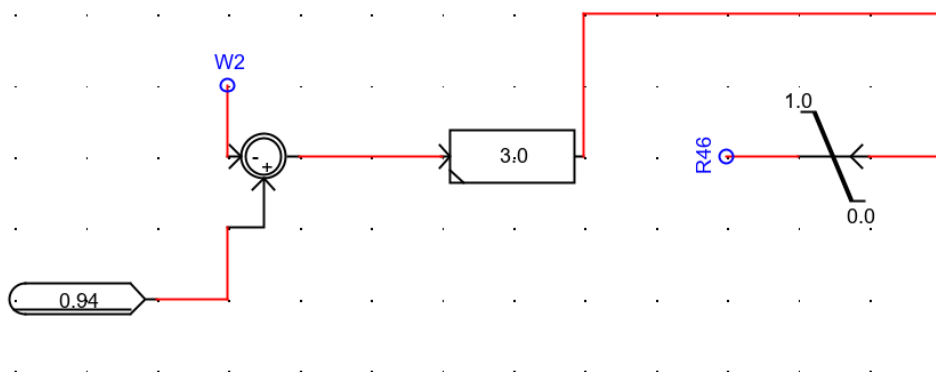
Voolu väärtuste ja nende ajalise kestuse määramise järel kujutab üleergutuse piiraja endast sarnaselt varasemalt kirjeldatud piirajatele PI regulaatorit. Erinevuseks on see, et olukorras, kus ergutusvool on väiksem kui 5 A ning integreeriva lüli väljund on positiivne, nullitakse integraatori väljund iga 4 ms järel. PI regulaatori väljund on piiratud nulli ja pingeregulaatori referentspinge väärtustega.



Joonis 2.10. Üleergutuspiiraja üldskeem programmis RSCAD

Üleergutuse piiraja väljundsignaal R44 (Joonis 2.10) on sisendiks R29 pingeregulaatorile (Joonis 2.3), ning nagu eelmisi piirajaid saab ka seda vastavalt vajadusele sisse või välja lülitada, kasutades selleks signaali R30.

Viimaseks kirjeldatavaks piirajaks on alasageduspiiraja. Seda piirajat kasutatakse, et vältida generaatori raua kuumenemist madalatel sagedustel või ülepinge puhul. Piiraja loogikaskeem on toodud alljärgneval joonisel (Joonis 2.11)

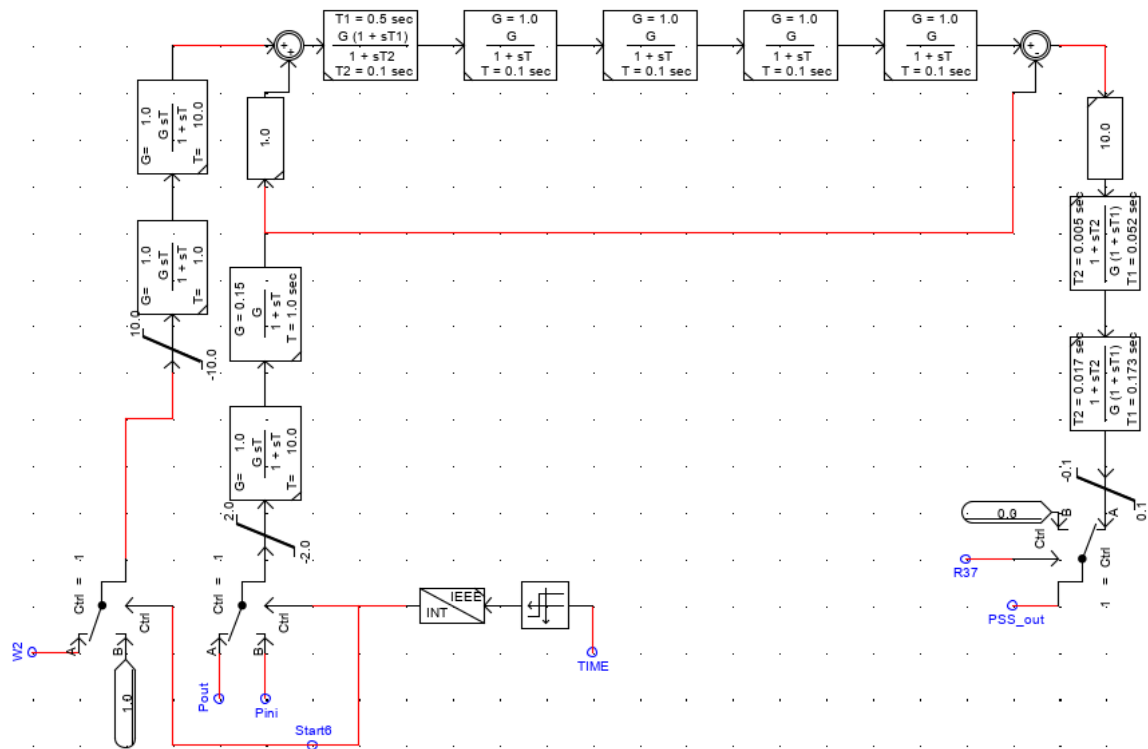


Joonis 2.11. Ergutusregulaatori alasageduspiiraja loogikaskeem programmis RSCAD

Nagu jooniselt (Joonis 2.11) näha, siis piiraja reageerib sellele, kui generaatori sagedus langeb alla 0,94 kordse nimisageduse. Seejärel tekkinud viga võimendatakse ning saadetakse tulemus edasi automaatse pingeregulaatori sisendisse R23 (vt. Joonis 2.3). Ka seda piirajat saab vastavalt vajadusele sisse või välja lülitada.

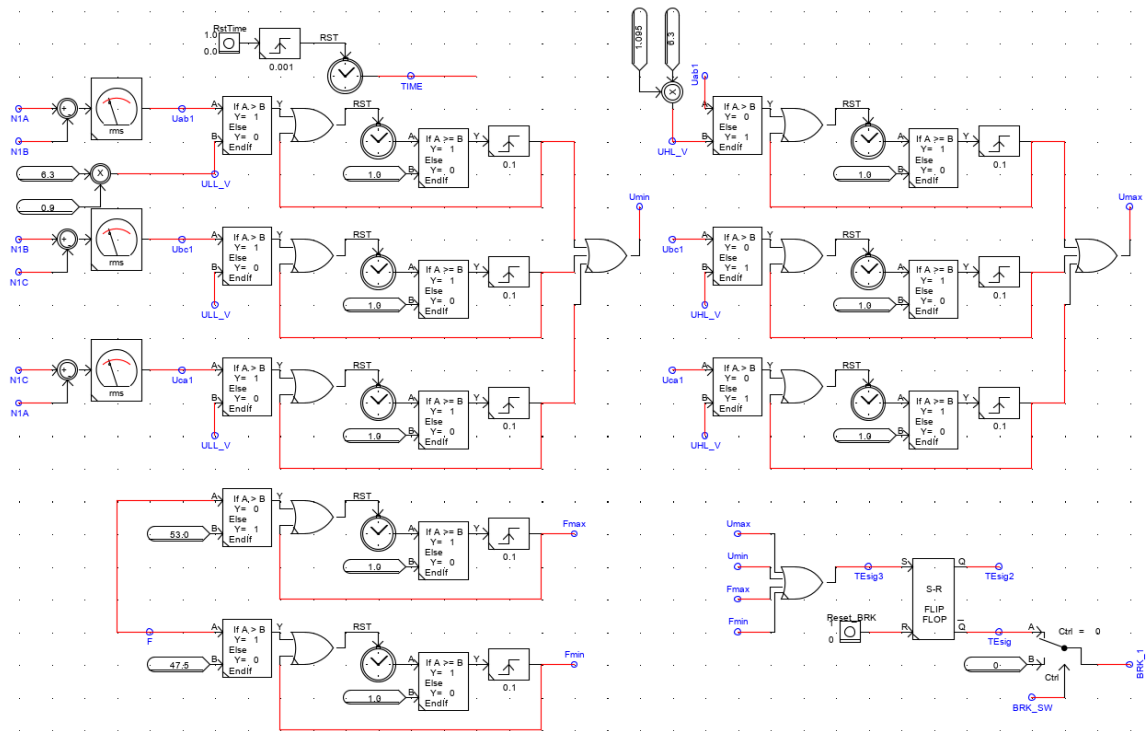
2.4 Elektrisüsteemi stabilisaatori mudel

Elektrisüsteemi stabilisaatori mudeli sisenditeks on elektrimasina poolt toodetav aktiivvõimus ja masina pöörlemiskiirus (Joonis 2.12). Mõlemad sisendid läbivad mudeli esimeses osas kõrgpääsfiltri, et vältida madalsageduslike ja püsiseisundi komponentide pääsemist stabilisaatori ahelasse ja takistada nende poolt tekitatud signaalnihke tekkimist. [4] Järgmine, kahe summeeriva lüli vahele jääv filter välistab kõrgematel sagedustel võngete – näiteks generaatori võlli torsioonvõnkumiste, jõudmise stabilisaatori väljundsignaali [4]. Stabilisaatori loogikaskeemi viimase kolme ploki ülesandeks on elimineerida filrites tekkinud faasinihe ja seada sobivaimaks stabilisaatori väljundsignaali võimendustegur. See tagab, et stabilisaatori ja ergutusregulaatori poolt tekitatav elektriline moment tekib generaatoris õigel ajahetkel ja on õige suurusega, et aidata kaasa soovimatute võnkumiste summutamisele.



Joonis 2.12. Elektrisüsteemi stabilisaatori mudeli loogikaskeem programmis RSCAD

Järgmise mudeli osana vaadeldakse üle- ja alapingekaitset, ning üle- ja alaseduskaitsete modelleerimist. Kaitsete loogikaskeem on kujutatud alltoodud joonisel (Joonis 2.13).



Joonis 2.13. Üle- ja alapinge ning -sageduskaitsete modelleerituna programmis RSCAD

Eeltoodud skeemi kohaselt lahutatakse generaator võrgust juhul kui pinge alajaamas, kuhu generaator on ühendatud, on väiksem, kui 5,67 kV või suurem kui 6,90 kV. Sageduse poolelt on alumine ja ülemine piir seatud vastavalt 47,5 Hz ja 53 Hz peale. Võimsuslüliti lülitatakse välja nii iga üksiku tingimuse kui ka mitme tingimuse samaaegse täitmise korral.

Sellega on antud ülevaade mudeli erinevate osade loogikaskeemidest, kõiki kirjeldatud funktsioone kasutatakse ka reaalse pingeregulaatori seadistamisel. Lisaks kirjeldatud skeemidele on matemaatilises mudelis kirjeldatud ka turbiini regulaatori mudelit, mille täpsemat töötamist käesolevas peatükis ei käsitletud, kuna selle töö ei ole otseselt sõltuv pingeregulaatori ega selle matemaatilise mudeli toimimisest.

3. KATSESTENDI KOOSTAMINE JA TULEMUSTE VERIFITSEERIMINE

3.1 Katsestendi väljatöötamine

Käesolevas peatükis pakutakse välja lahendus ergutusregulaatori Basler DECS-250 ühendamiseks reaalaajasimulaatoriga ning kaalutakse erinevaid võimalusi pilooterguti ning erguti simuleerimiseks. Lõputöö kirjutamise algfaasis kaaluti erguti simuleerimiseks sobiva võimsusega ning takistusega takisti kasutamist. Arutelu käigus juhendajaga leiti, et sellisel juhul oleks nii pinge mõõtmine erguti klemmidel kui ka ergutusvoolu mõõtmine raskendatud. Probleemseks oleks osutunud ka mõõtetulemuste edastamine reaalaajasimulaatorisse RTDS. Seega otsustas autor lõputöö juhendaja soovitusel kasutada erguti simuleerimiseks elektroonilist alalisvoolukoormust Elektro-Automatik EL 9200-35B, mis lahendas ühe korraga kaks probleemi: piisava võimusega takisti leidmise ning pinge ja voolu mõõtmise takistil.

Pilooterguti simuleerimise asemel kasutatakse regulaatorile ergutuspinge tagamiseks esimeses lahenduses labori reguleeritavat vahelduvpingeallikat. Matemaatilise mudeli koostamisel aluseks olnud elektrijaamas kasutati ergutusregulaatori toiteks pilootergutit, mille väljundpinge alaldati.

Pilooterguti väljundpingega sarnaseima tulemuse saavutamiseks oleks lõputöö juures olnud hea kasutada sobiva võimsuse ja pingega alalisvoolu toiteplokki, sellise seadme puudumisel otsustati kasutada muudetava väljundpingega vahelduvpingeallikat. Reguleeritava pingeaallika väljundi efektiivväärtus seati võrdseks elektrijaamas kasutatud alalispinge väärtusega, et saada katsete tegemisel võimalikult sarnaseid tulemusi. Võrdsete pingete peamine eelis on see, et nii ergutusregulaatoris kui ka selle matemaatilises mudelis on võimalik kasutada samu PID regulaatori võimendustegureid; erinevaid sisendpingeid kasutades tuleks need vastavalt ümber dimensioneerida.

Enne skeemi keerukamate osade juurde asumist on vaja lahendada ka ergutusregulaatori kontrollahelate toitmine. Kui ergutuse toiteks kasutatakse 155 V vahelduvpinget, siis seadme juhtsüsteeme võib toita nii 24 kui 48 voldise alalispingega. Katsestendis kasutatakse ergutusregulaatori toiteks töö koostamise hetkel laboris kasutuseta seisnud Mean Well SDR-120-24 tööstuslikku alalisvoolu toiteplokki (Joonis 3.1), mis on võimeline 24 V pinge juures andma maksimaalselt 5 amprise tugevusega voolu.



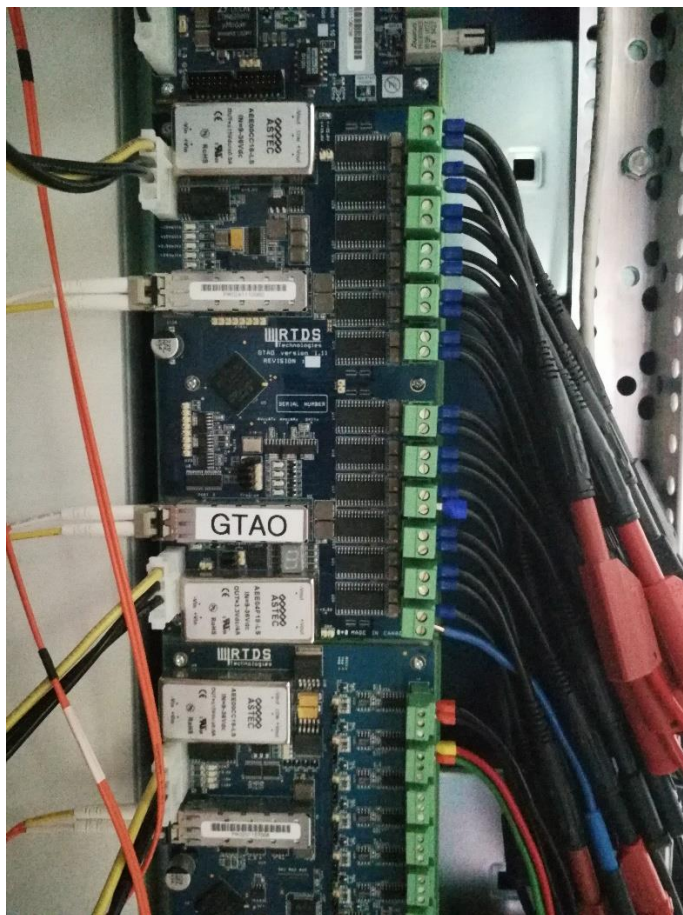
Joonis 3.1. Toiteplokk Mean-Well SDR-120-24

Reaalajasimulaator RTDS (vt Joonis 3.5) on näol on tegemist küllaltki erilise seadmega, mis on spetsiaalselt loodud elektrisüsteemi reaalajasimulatsioonide läbiviimiseks. Enamik maailma kaitsereleede ja kontrollisüsteemide tootjaid kasutavad oma seadmete testimiseks just RTDS simulaatoreid. [22] Seadme teeb eriliseks kogu simulaatori riistvara spetsiaalne väljatöötamine just elektrivõrgu simulatsioonide läbiviimiseks. Väiksemahulisi ja lihtsamaid simulatsioone on võimalik läbi viia minimaalselt ühe mikrosekundise ajasammuga, kuid suuremahulisemate ja keerukamate simulatsioonide puhul jääb samm tavaliselt 25-50 mikrosekundi vahele [22]. Lisaks võimsatele protsessoritele, mis tegelevad elektrivõrgu ja kontrollisüsteemide protsesside arvutamisega, on simulaatoriga ühendatud ka sisend- ja väljundkaardid, mis võimaldavad simulaatoriga ühendada erinevaid seadmeid ning uurida nende tööd simulaatoris läbi mängitavates olukordades.

Simulatsiooni saab kasutaja juhtida spetsiaalselt RTDS-i riistvara kasutajaliideseks loodud tarkvara RSCAD abil, mille kasutusõigus kaasneb simulaatori soetamisega. Programmis on võimalik luua erinevate võrkude või seadmete mudeleid, või uurida mõnda programmis sisalduvat näidismudelit. Lisaks sellele on võimalik programmi importida ka varasemalt PSCAD tarkvaras loodud elektrivõrgu mudeleid, selle tarbeks on programmi loodud spetsiaalne konvertimistööriist. Seda abivahendit on kasutatud ka konkreetses lõputöös kasutatud mudeli puhul. Töö koostamisel saadud kogemuste põhjal saab öelda, et mudelite konvertimine ei pruugi õnnestuda esimesel katsel ja tulemusena saadud mudelis tuleb selle korrektse töö saavutamiseks mõningaid muudatusi sisse viia.

Nagu kirjeldatud peatükis (1.7), on nii generaator kui ka ekvivalentne elektrivõrk simuleeritud reaalajasimulaatoris. See tähendab, et mõõteandmed pinge kohta alajaama lattidel ja generaatori

klemmidel ning generaatori voolu kohta, mis reaajasimulatsioonis välja arvutatakse, tuleb edastada ergutusregulaatorile. Selleks kasutatakse simulaatori *GTAO (Giga-Transceiver Analogue Output)* kaarti (Joonis 3.2). Kaart suudab väljastada signaali maksimaalse amplituudiga 10 V. [23] Kasutatava DECS-250 pingesisendid on võimelised taluma maksimaalselt 600 V pinget. [7] Kuna simulaatori analoogväljund ei ole võimeline [24] väljastama DECS-250 mõõteseadmetele vajalikku võimsust (maksimaalselt 1 VA [7]), siis on vaja väljundsignaali võimendada. Signaali võimendamiseks kasutatakse OMICRON Electronics CMS 356 võimendit.



Joonis 3.2. RTDS-i analoog sisend- ja väljundkaardid

Ülaltoodud joonisel on kujutatud reaajasimulaatori analoog väljund- ja sisendkanalite ühendusi väliste seadmetega. Joonise paremas servas olevad juhtmed edastavad järgmist infot (ülevalt alla liikudes): esimesed kolm kanalit – kolme faasi pingemõõtmised generaatori klemmidelt esimesse võimendisse, kanalid 4-6 – generaatori voolu mõõtmised esimesse võimendisse, kanalid 7-9 – pingemõõtmised alajaama lattidelt, kanalid 11 ja 12 vastavalt pinge väärtuse reguleerimine +/-10% pingeregulaatorile ja takistuse väärtus elektroonilisele alalisvoolukoormusele.

Omicroni võimendit kasutatakse peamiselt releekaitseseadmete testimiseks – võimendi abil on võimalik erinevatele releedele edastada sobiva suurusega voolu või pinget ning testida, kas releed

määratud sätete juures rakenduvad. Võimendit saab kasutada erinevates konfiguratsioonides, väljastada saab näiteks kolm võimendatud pingesignaali ja kolm voolusignaali, nagu seda tehakse käesolevas lõputöös. Samas on võimalik kasutada ka kuute erinevat vooluväljundit. Eriti suurt voolu nõudvate rakenduste tarbeks on teostatav ka mitme samasuguse võimendi rööbiti ühendamine.

Omicroni võimendi (Joonis 3.3) abil tõstetakse analoogsignaali amplituud 100 voldini, mis on Eestis laialt levinud pingetrafoode sekundaarpinge [25]. Kasutataval DECS-250-I on ka automaatse sünkronisaatori funktsioon. Automaatne sünkronisaator võimaldab õige seadistuse korral sulgeda generaatori võimsuslülitit automaatselt sellisel ajahetkel, kus generaatori- ja võrgupinge vaheline faasinihe on nullilähedane. Selle funktsiooni kontrollimiseks on vajalik saada pinge mõõtmised ka generaatori võimsuslülitit võrgu poolt küljelt. Kuna pingesignaale on vaja mõõta kahest punktist (enne ja pärast generaatori võimsuslülitit), siis on lisaks vaja kasutada ka teist samasugust võimendit.



Joonis 3.3. Võimendi Omicron CMS 356 esipaneel [26]

Sünkroongeneraatori faasivoolu mõõtmised saadakse reaajasimulaatorist analoogselt pingemõõtmistele 0-10 V analoogsignaalina. Sarnaselt pingesignaalile ei saa ka neid suurusi otse ergutusregulaatori sisendiks kasutada. Voolu väärtused võimendatakse kasutades sama võimendit, mida kasutatakse generaatori klemmipinge mõõtmistulemuste võimendamiseks, võimendisse antavad sisendsignaali väärtused skaleeritakse nii, et väljundvool ei ületaks 5 A, mis on DECS-250 puhul maksimaalne voolutrafoode sekundaarvool.

Staatorimähise simuleerimiseks kasutatakse lõputöö juhendaja soovitusena juhivat alalisvoolukoormust. Töös kasutatav elektrooniline koormusplokk Elektro-Automatik EL 9200-35B (Joonis 3.4) omab analoog sisend ja väljundkanaleid [27]. Analoogsisendi abil on võimalik määrata, kui suurt

voolu, pinget või võimsust peab koormusplokk teda toitvast ahelast tarbima või kui suurt takistust peab seade ahelas kujutama. [27]

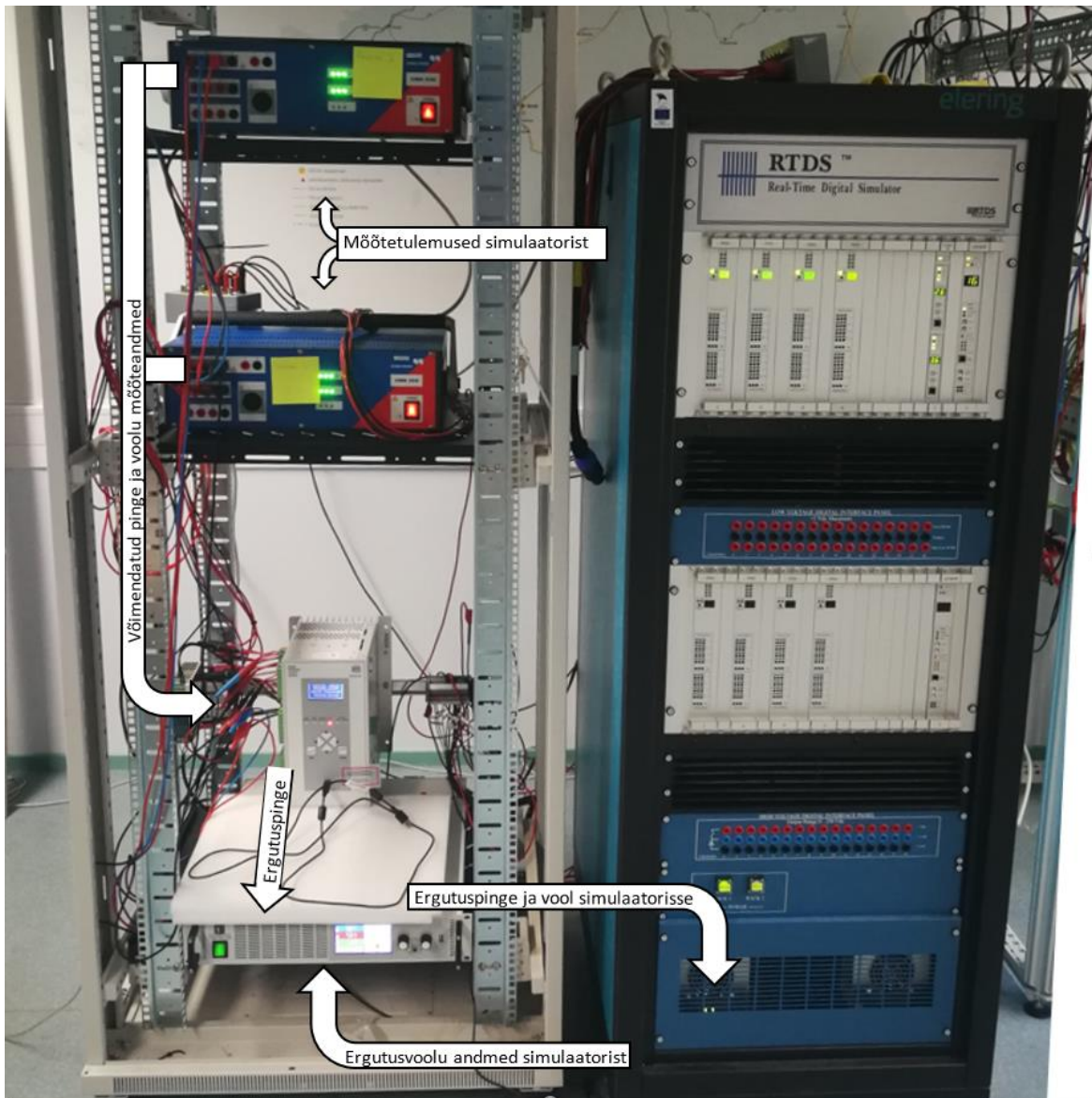


Joonis 3.4. Elektro-Automatik EL 9200-35B alalisvoolukoormuse esipaneel [28]

Väljundsignaalidest on käesoleva töö kiires olulisimad koormusloki tekkivad ergutusvool ja -pinge. Need signaalid, eelkõige ergutuspinge, on omakorda *GTAI (Giga-Transceiver Analogue Input)* kaardi vahendusel sisendiks reaajasimulaatorile. Simulaator arvutab saadud ergutuspinge väärtuse ning sünkroongeneraatori voolu ja pinget põhjal välja konkreetsetel tingimustel generaatoris tekkiva ergutusvoolu. Ergutusregulaatorile ei ole vaja ergutusvoolu suurust edastada, kuna vastavad mõõtmised teostatakse seadmesiseselt.

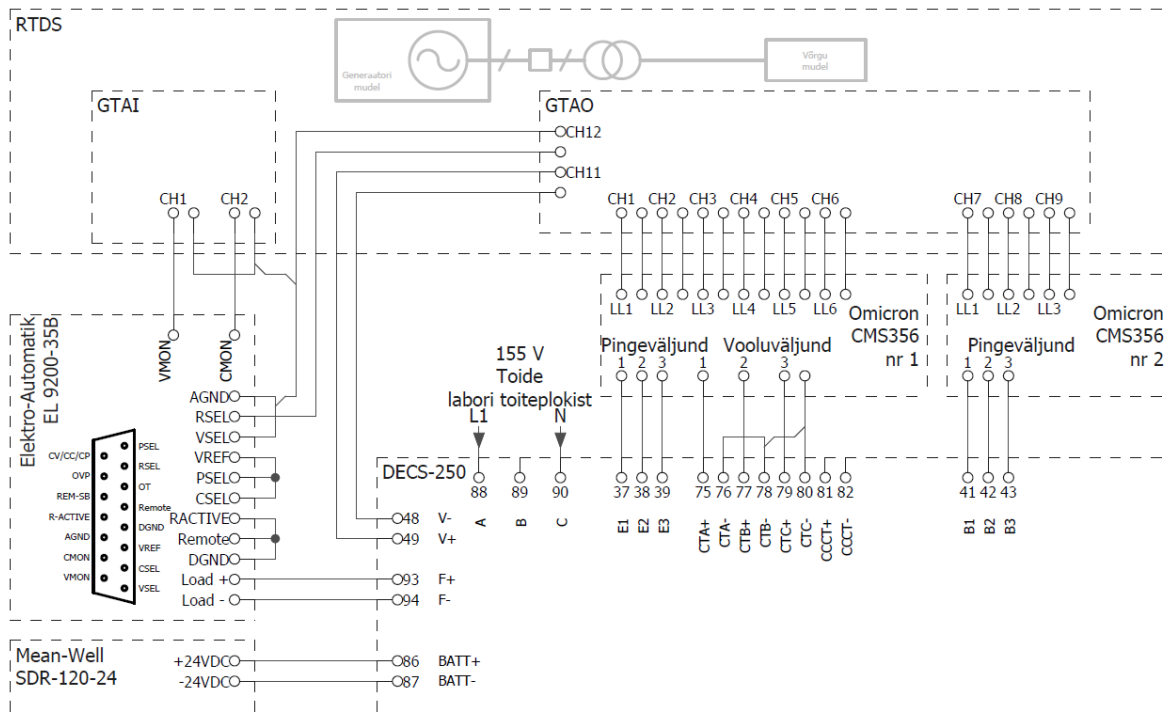
Andmete korrektseks skaleerimiseks on vaja reaajasimulaatori mudelis määrata nii sisend- kui väljundsignaalidele õiged kordajad. Esimesena käsitletakse sisendsignaale elektroonilisest koormusplokist. Analoogväljundite väärtused on konkreetse koormusploki puhul seotud seadme nimiväärtustega, seadme maksimaalne vool on 35 A ja maksimaalne pinge 200 V [27] – see tähendab, et kui reaajasimulaatorisse jõuab pinge 5 V, siis on tegelik pinge koormusploki klemmide vahel 200 V. Ergutusvoolu puhul on maksimaalse sisendsignaali puhul voolu väärtuseks 35 A. Järgnevalt tuleb vastavalt nendele väärtustele seada kordajad RSCAD-i mudeli GTAI kaardile, vastavalt seadme kasutusjuhendile tuleb kordajaks valida kaardi sisendsuuruse ja väljundsuuruse jagatis. [29] See tähendab, et olukorras, kus kaardi sisendis on pinge 1 V ja mudelis on seatud kordaja 5, annab kaart simulatsiooni pinget väärtusega 0,2. [29] Antud olukorras on kaardi väljundsignaal mõõdetav voltides, mis tähendab, et skaleerimiseks tuleks kasutada 5 V ja 200 V jagatist ehk 0,025. Ergutusvoolu väärtuste puhul tuleb samade põhimõtete alusel valida kordajaks 5 ja 35 jagatist, ehk 0,143.

Järgneval joonisel on toodud katsestendi lõplikku lahenduse illustratsioon, kus on võimalik näha kõiki kasutatavaid seadmeid ning nendevahelisi ühendusi. Joonise paremal küljel asub reaajasimulaator RTDS, vasakul asuvatel riiulitel paiknevad ülevalt alla liikudes kaks Omicron Electronics võimendit, seejärel Basler DECS-250 ergutusregulaator ja erguti simuleerimiseks kasutatav elektrooniline alalisvoolukoormus Elektro-Automatik EL 9200-35B. Ergutusregulaatori kõrval on võimalik märgata ka regulaatori toitmiseks kasutatavat alalisvoolu toiteploki. Lisaks on joonisel noolte abil selgitatud andmete liikumist erinevate seadmete vahel.



Joonis 3.5. Katsestendi illustratiivne skeem reaalse seadega

Kasutatavate seadmete lõplik ühendusskeem on kujutatud järgneval joonisel (Joonis 3.6.). Skeemil on võimalik täpsemalt tutvuda kõigi katsestendis kasutatavate seadmete vaheliste ühendustega. Skeemi ülaosas on kujutatud reaalajasimulaatorit RTDS, koos selle sisend- ja väljundkaartidega. Vasakul äärel on kujutatud alalisvoolukoormust ja alalisvoolu toiteplokki, mida kasutatakse ergutusregulaatori toiteks. Skeemi alaosas paremal on kujutatud ergutusregulaatorit Basler DECS-250 ning regulaatori ja reaalajasimulaatori vahel on kujutatud kahte signaalivõimendit Omicron CMS 356. Erguti toiteks kasutatavat muudetava väljundpingega vahelduvpingeallikat skeemil kujutatud ei ole, küll aga on välja toodud, milliste DECS-250 klemmide külge on toide ühendatud.



Joonis 3.6. Katseseadmete ühenduskeem

3.2 Basler DECS-250 seadistamine

Basler DECS-250 seadistamisel on kasutatud analoogselt matemaatilisele mudelile juba varem välja töötatud seadistuste faili, mida muudeti vastavalt katsesendi vajadustele ning matemaatilise mudeli eripäradele. Esimeseks ning üheks olulisemaks muudatuseks seadistustes oli ergutusregulaatori jõuosa toitelahenduse muutmine alalispingelt vahelduvpingele. Algses seadete failis oli selleks kasutatud alalispinget suurusega 155 V, kuna ergutusregulaator sai toite generaatoriga samal võllil paiknevast pilootergutist, mille väljundpinge alaldati. Ülikooli laboratooriumis vajaliku võimsusega alalisvoolu toiteplokk puudus ning seetõttu kasutati toiteallikana labori töölauda integreeritud muudetava väljundpingega vahelduvvoolu toiteplokki (vt. 3.1). Saavutamaks võimalikult sarnaseid katsetulemusi seadistati toiteploki väljundpinge efektiivväärtus 155 voldile, mis oli elektrijaama pilooterguti väljundpinge.

Jõuosa toitepinge muutmine on oluline, kuna olukorras, kus on üle mindud näiteks kolmeefaasiliselt toitet ühefaasilisele, tajub ergutusregulaator sellisel juhul toitepinge ebasümmeetriat põhjustades sellega toite kaotuse kaitse rakendumise ning ergutusregulaatori väljalülitumise.

Lisaks sellele oli pingeregulaatorile vaja luua sisend reguleerimise sättepinge tõstmiseks ja langetamiseks. Sarnaste eesmärkide täitmiseks on regulaatoril analoog sisendkanal (Joonis 3.2 kaks alumist juhtmestatud kanalit), mis katsesendi puhul ühendatakse reaajasimulaatoriga RTDS.

Joonis 3.7. DECS-250 analoog-sisendkanalite seadistamisvõimalused

Vastavalt DECS-250 kasutusjuhendile tähendab ühe voldine pinge kasv analoogsisendis ühe protsendilist generaatori soovitava väljundpinge muutumist [7]. RTDS simulaatori analoog-väljundkanalite maksimaalne väljundpinge on 5 V, millest tuleneb ka joonisel (Joonis 3.7) toodud võimendusteguri väärtus 2 (sättepinge reguleerimisvahemikuks soovitakse luua mõlemas suunas 10%). Lisaks sellele oli vajalik muuta ka generaatori inertsikonstanti võnkesummuti seadistustes, mis oli algses sätete failis valesti määratud. Samuti tuli kohandada pingetrafoide ühendusviisi alajaama lattidega, mis oli erinev, kuna algne sätete fail oli mõeldud kasutamiseks ergutusregulaatoriga, millel puudus automaatse sünkronisaatori funktsioon. See tähendab, et puudus vajadus kolme faasi pingete mõõtmiseks.

Esimese asjana ergutusregulaatori seadistamisega alustades tuleks veenduda, et seatakse korrektsed generaatori nimiaandmed. Praktiliselt kõik järgmiste seadistuste väärtustest põhinevad suhtühikutel ja seetõttu muudab generaatori või erguti nimipinge valesti seadistamine oluliselt ka teiste seadete primaarühikutes väärtusi. Olulisteks seadistusteks, mida jälgida on kindlasti ergutusregulaatori erinevate osade: proportsionaalse, integraalse ja derivatiivse lüli võimendustegurid, selle lõputöö käigus neid seadeid küll ei muudetud, kuid just nende kolme parameetriga pannakse paika seadme reageerimiskiirus pingemuutusele ning määratakse näiteks seda, kui suur võib olla maksimaalne ülevõnge. Neljas oluline parameeter on pingeregulaatori enda võimendustegur, kuna selle teguriga korrutatakse läbi terve PID regulaatori väljundsignaal.

Järgmiste tähtsamate funktsioonidena tuleks paika panna üle- ja alaergutuspiirajate seadistused. Need seadistused on olulised vältimaks kahjustuste tekitamist sünkroongeneraatorile. Kasutajaliidest kasutades on võimalik veel seadistada nii generaatori kui erguti üle- ja alapingekaitse ning ergutusregulaatori toite kaotuse kaitse. Generaatori kaitseks on võimalik veel seadistada võimsusvoo suunda kontrolliv kaitse ning ergutuse kaotuse kaitse. Need kaitseid väldivad gene-

raatori töötamist mootorina ning lubatust suuremat reaktiivvõimuse tarbimist, kui ergutusüsteemis on toimunud mõni rike. Ka konfigureeritavate kaitsete seadistamine on suhteliselt lihtne – tuleb üksnes valida, millisele parameetrile kaitse seatakse ja kui suur on tema sätteväärtus ning rakendumisviide.

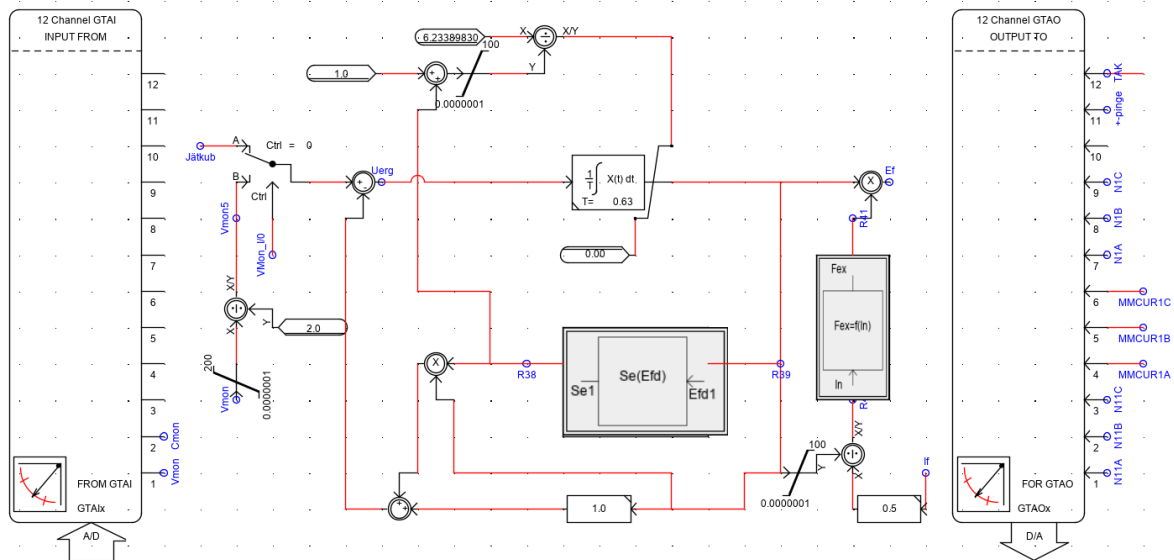
3.3 Teostatavate katsete kirjeldus

Lõputöös teostatakse katseid, mille eesmärk on kontrollida generaatori ja selle ergutussüsteemi reageerimist erinevatele võrgupinge muutustele ja vaadelda, kuidas seade toimib lühise olukorras. Seadme väljalülitumine suhteliselt kaugel toimuvate lühiste puhul on elektrisüsteemi poolt vaadates lubamatu. Tootmiseseadmete väljalülitumine võib põhjustada võimsuse puudujäägi, mille tõttu hakkavad välja lülituma lühise kohast üha kaugemal asuvad tootmisüksused, käivitades nii ahelreaktsiooni, mille tõttu võib halvimal juhul kogu süsteem kustuda.

Katseid teostatakse eelpool kirjeldatud ergutusregulaatori matemaatilise mudeliga ning reaalse ergutusregulaatoriga Basler DECS-250. Katsete planeerimisel on võetud aluseks Vabariigi Valitsuse määruse nr 184 „Võrgueeskiri“ paragrahv 25, millega pannakse paika protseduur generaatorite nõuetekohasuse kontrollimiseks. Raskeimaks simuleeritavaks olukorraks on nii mudeli kui ergutusregulaatori katsetamise korral kolmeefaasilise lühise tekitamine 110 kV alajaama lattidel. Lühise nõutav pikkus on vastavalt määrusele 0,25 sekundit [6]. Järgnevateks katseteks on võrgupinge hüppeline muutumine nii üles- kui allapoole. Määruse kohaselt tuleb pinget muuta 0,95-1,05 kordse nimipingeni [6] ning vastupidi. Seejuures on määratud erinevad tingimused, millele generaatori väljundpinge peab antud olukordades vastama.

Katsetuste läbiviimisel kasutatakse esmases mudelis kasutusel olnud sünkroonmasina mudelit (vt Joonis 2.2.) selles elektrimasina mudelis puudub erguti kui elektrimasina mudel. Vastavalt varasemale kirjeldusele (vt. punkt 2.2), on erguti matemaatilises mudelis simuleeritud ekvivalentse mudelina, mis on ühendatud ergutusregulaatori mudeliga. Sellest tulenevalt ei ole võimalik reaalse ergutusregulaatori väljundit otse modelleeritava generaatori külge ühendada. Seetõttu tuleb võrreldavate katsetulemuste saamiseks tuleb regulaatori väljund ühendada ekvivalentse mudeli sisendiga. Ühendusskeemi ilmestab järgnev joonis (Joonis 3.8.), millelt nähtub, et ergutuspinge signaal jõuab reaalajasimulaatorisse läbi GTAI kaardi, olles üheks võimalikest sisenditest erguti matemaatilisele mudelile. Katsetulemuste lihtsamaks võrdlemiseks on võimalik katseskeemi kasutajal ümberlüüti abil valida, kas soovitakse kasutada ergutusregulaatori matemaatilise mudeli või reaalse seadme väljundpinget. Reaalsete mõõtmiste tulemused on vajalik skaleerida selliselt, et need oleks võrreldavad matemaatilise mudeli poolt väljastatava suhtühikutes signaaliga. Ideaalsel

juhul peaks skaleerimistegurina kasutama baassuuruseks olevat erguti tühijooksupinget 5,9 V. Tegelikult on aga takistuselt mõõdetud pinge ja voolu väärtused veidi moonutatud ning ergutuspinge ja voolu sarnaste kujude saavutamiseks otsustati, et optimaalne on kasutada skaleerimisteguri väärtust 2.



Joonis 3.8. Ergutusregulaatori pingeväljundi ühendamise mudeli loogikaskeemi

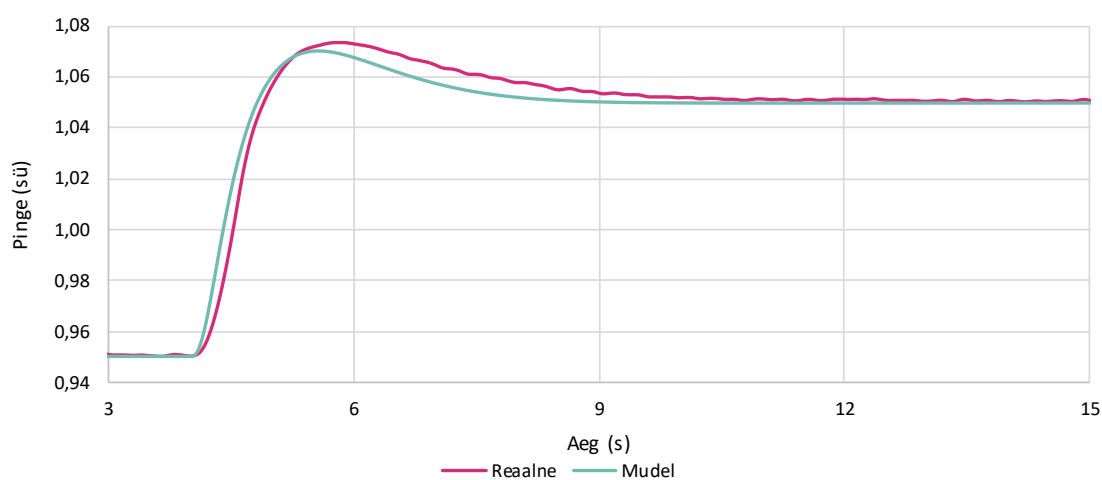
Ülaltoodud joonisel ühe reaajasimulaatori sisendina kirjeldatud signaal CMon kujutab endast voolu mõõtetulemust katsetes kasutatud ergutis. Antud signaal on katsete juures vajalik eelkõige sisendsignaali õige skaleerimise jaoks, ning ergutusvoolu graafikute kuju sobivuse hindamiseks.

3.4 Katsete tulemused ja järeldused

Katsed põhinevad Eesti Vabariigi Valitsuse määruse nr 184 „Võrgueeskiri“ paragrahvis 25 esitatud nõuete täitmise kontrollimisel. Antud määrus näeb ette rea katseid, mille käigus kontrollitakse elektri tootmisseadme nõuetele vastavust. Konkreetsete katsetuste alusel otsustatakse, kas antud generaator on sobilik võrguga ühendamiseks või mitte, seetõttu ongi katsetulemuste analüüsimisel kasutatud peamiselt võrgueeskirja nõuetega seatud väärtusi. Võrgueeskirjas toodud olulisimad nõuded puudutavad pinge hüppelisel muutusel tekkivat pinge ülevõnget ning reguleerimisel ühelt väärtuselt teisele muutumisulatusel 90%-ni jõudmiseks kuluvat aega. Sätestatud on, et ülevõnge võib olla maksimaalselt 15% reguleerimisulatusel ning tühijooksul pinge muutmisel kümne protsendi võrra võib 90% muutmisulatusel saavutamise aeg olla staatilise erguti ning harjadeta erguti korral vastavalt 0,3 ja 0,5 sekundit [6].

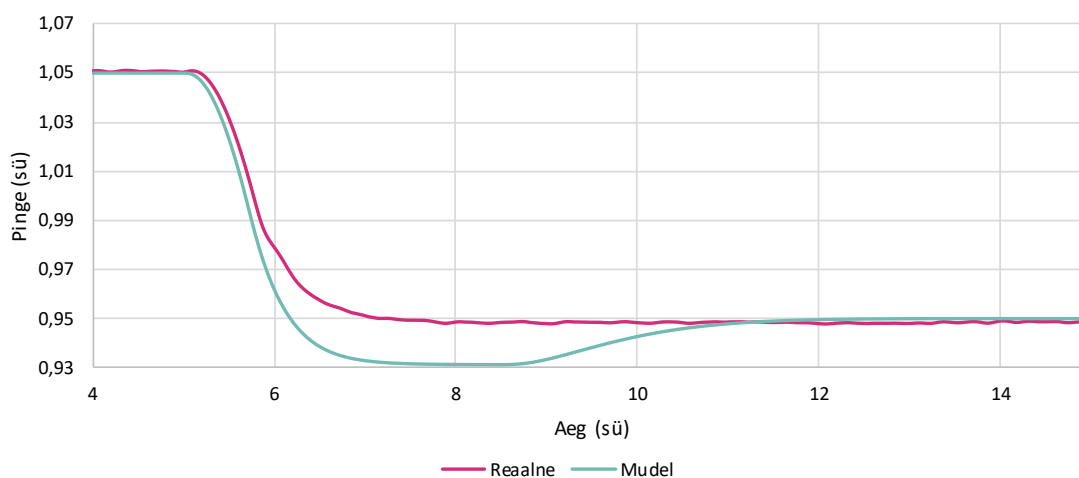
Esimese katsetuse käigus kontrolliti ergutusregulaatori reaktsiooni kümneprotsendilisele pinge hüppelisele muutusele. Pinget tõsteti 0,95 sü-lt 1,05 sü-ni, mis tähendab primaarühikutes

pingehüpet 5,99 kV-lt kuni 6,62 kV-ni (baaspingeks on modelleeritava sünkroongeneraatori nimipinge 6,3 kV). Antud katse tulemused on esitatud graafiliselt järgneval joonisel (Joonis 3.9). Nagu jooniselt näha, on testitud pingeregulaatori reguleerimiskõver väga sarnane matemaatilise mudeli omale. Pingeregulaatori ja matemaatilise mudeli korral on graafiku tõusuaeg 1,04 sü saavutamiseni, ehk 90% muutumisulatuse katmiseni vastavalt 0,56 ja 0,54 sekundit. Pinge ülevõnked ulatuvad vastavalt 1,074 ja 1,071 suhtühikuni, kusjuures mudeli maksimum saabus ajahetkel 5,568 ning seadme oma ajahetkel 5,837, ehk 0,269 sekundist hiljem. See tähendab, et nii mudeli kui testitava seadme pinge ülevõnke suurus ületab võrgueeskirjas sätestatud määra, mis lubaks antud olukorras pinge maksimaalse väärtusena 1,065 suhtühikut.



Joonis 3.9. Katsetulemused reaalse ergutusregulaatori ja ergutusregulaatori matemaatilise mudeliga AC8B hüppelise pingetõusu tingimustes

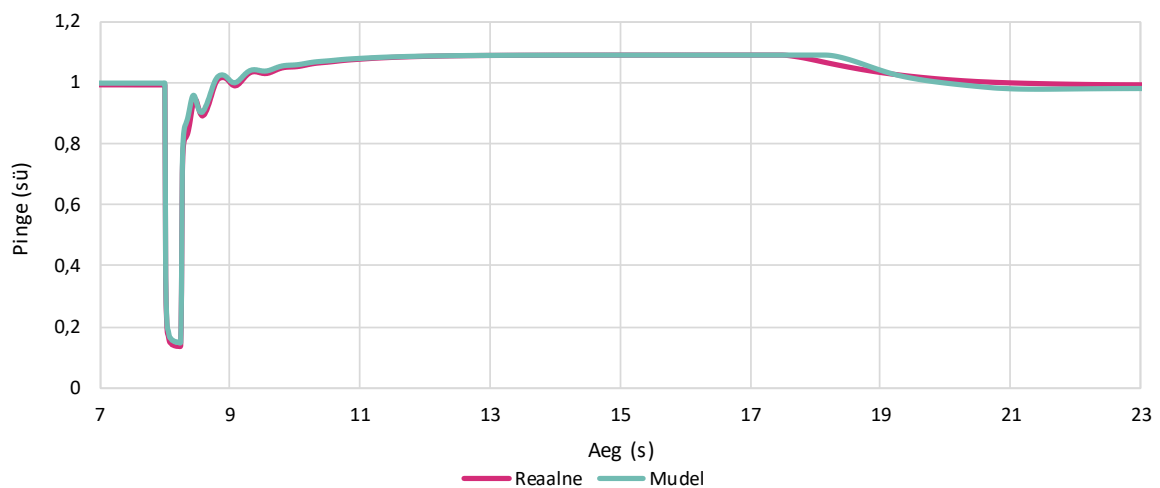
Teise katsena sooritati analoogselt pinge hüppelise tõusu katsele ka pinge hüppelise languse katse, mille tulemused on kirjeldatud alloleval joonisel (Joonis 3.10).



Joonis 3.10. Katsetulemused reaalse ergutusregulaatori ja ergutusregulaatori matemaatilise mudeliga AC8B hüppelise pingelangemise tingimustes

Katsele tulemustele kehtivad Võrgueeskirja järgi samasugused nõuded nagu pinge kasvu katsele, olulised on taaskord ülevõnke ulatus ning 90 protsendi reguleerimisvahemiku täitmise kiirus. Nagu jooniselt nähtub, esineb selle katse puhul olulisi erinevusi pingeregulaatori ja selle matemaatilise mudeli töös. Matemaatilise mudeli puhul on pinge ülevõnke oluliselt suurem, ulatudes koguni 0,931 suhtühikuni, reaalse ergutusregulaatori puhul seevastu ülevõnke sisuliselt puudub. Samuti on erinevus ajavahemikes, mille jooksul täidetakse 90% reguleerimisvahemikust, reaalsel regulaatoril kulub selleks 1,062 sekundit, matemaatilisel mudelil aga 0,883 sekundit. Nii reaalne regulaator kui ka selle matemaatiline mudel käituvad antud olukorras võrgueeskirjale mittevastavalt. Kumbki regulaatoritest ei suuda reguleerimisprotsessi 90% ulatuses täita 0,5 sekundi jooksul, lisaks sellele on matemaatilise mudeli ülevõnke suurem määrusest lubatavast.

Kolmandaks sooritatud katseks oli kolmefaasilise maalühise tekitamine 110 kV alajaama lattidel. Vastavalt Võrgueeskirja nõuetele peab elektrisüsteemis trafo alampingepoolele ühendatud tootmiseseade suutma taluda järgmisi tingimusi [6]: pingelangust 0%-ni nimipingest 0,25 sekundiks, pingelohule järgnevat lineaarset pinge tõusu 90%-ni nimipingest ning lühise järgselt suutma hoida nimipinget tasemel, mis on vähemalt 90% liitumispunkti elektrivõrgu nimipingest. Katse tulemused on kujutatud alljärgneval joonisel (Joonis 3.11). Katse tulemustest võib järeldada, et nii ergutusregulaatori matemaatiline mudel kui katsetatav seade toimivad pingelohu tingimustes vastavalt määruses nõutule. Mõlema katse puhul on näha, et seade suudab pärast lühise möödumist võrgu normaalse nimipinget taastada. Lühisele järgneva pingekasvu kestuseks oli reaalse pingeregulaatori korral 0,166 sekundit ning matemaatilise mudeli korral 0,128 sekundit.



Joonis 3.11. Katsetulemused reaalse ergutusregulaatori ja ergutusregulaatori matemaatilise mudeliga AC8B 0,25 sekundilise pingelohu tingimustes

Võrgu pingelanges lühise ajal matemaatilise mudeliga tehtud katse ajal 0,148 suhtühikuni ja reaalse regulaatoriga tehtud katse puhul 0,134 suhtühikuni. Lühisele järgneva kõrgema pingepiirangu periood kestab

matemaatilise mudeli puhul 0,6 sekundit kauem, kui reaalsel regulaatoril, kuid mudeli puhul võib täheldada veel mõningast ülevõnget normaalsele pingele naasmisel, mis vältab katsetulemusi esitava joonisel lõpuni.

Elektrisüsteemi stabilisaator on mõlema katse puhul sisse lülitatud. Samas on nii matemaatilise mudeli kui ka reaalse ergutusregulaatori puhul katsetulemuste parema võrreldavuse eesmärgil välja lülitatud üleergutuspiiraja, kuna seadmes ja ergutusregulaatori matemaatilises mudelis on üleergutuspiirajad konfigureeritud erineval viisil. Elektrisüsteemi stabilisaator on mõlema katse puhul sisse lülitatud.

Katsete tulemustest võib leida sarnasusi varasemate uurimustega. Näiteks võib paralleele tõmmata peatükis 1.8 kirjeldatud Taanis läbi viidud uuringuga, milles leiti samuti, et matemaatilise mudeli käitumine oli reaalse pingeregulaatori omale väga sarnane. Samuti leiti, et reaalse pingeregulaatori töö oli matemaatilise mudeli omast mõneti aeglasem. Viite põhjusena pakuti välja simulaatori ja pingeregulaatori vahel mõõtetulemusteks kuluv aeg – kindlasti tasuks ka käesolevas lõputöös koostatud katsestendi puhul tulevikus täpsemalt hinnata nii pinge- kui ka voolusignaalide võimendamisel tekkivat ajalist viidet.

Teadustöö kõrval on katsestendi ning ergutusregulaatori kasutamist võimalik siduda erinevate õppeainete programmidega – näiteks releekaitse ja stabiilsuse valdkonnas. Esimese puhul on võimalik vaadelda näiteks ergutusregulaatori üle- ja alaergutuspiirajate funktsioonide koordineerimist generaatori releekaitse töötamisega [30]. Selle uurimissuuna eesmärk on kindlustada, et elektrimasina kaitsmiseks loodud piirajad ei mõjuks halvasti süsteemi stabiilsusele. Teisalt saaks uurida ka seadmesse sisseehitatud releekaitsefunktsioone ning soovi korral võrrelda neid teiste kaitsereleede tööga. Elektrisüsteemi stabiilsusega seonduvates õppeainetes võimaldaks ergutusregulaatori kasutamine näiteks stabiilsuse katsestendi uuendamise käigus integreerida uude katsestendi ka digitaalne ergutusregulaator ja uurida selle tööd koos reaalse generaatori ning võrgu mudeliga. Erinevate generaatorite ja elektrivõrgu konfiguratsioonide uurimisel on aga paindlikum kasutada just reaajasimulaatoris modelleeritud elektrimasinaid ning elektrivõrke, sest sellisel juhul ei ole katsete tegemine piiratud ainult ühe konkreetse generaatori parameetritega. Seega võiks elektrisüsteemi stabiilsuse uurimise katsestendi uuendamisel kaaluda sellesse ka reaajasimulaatori integreerimist.

KOKKUVÕTE

Viimastel aastakümnetel aset leidnud elektrisüsteemide modelleerimise ja reaalajasimulatsioonide võimekusega seonduvad arengud on olnud aluseks suure potentsiaaliga tööriista loomisele tootmiseadmete vastavuse kontrollimisel võrgueeskirjades sätestatud nõudmistega. Varasemad, füüsilised katsetused tootmissüsteemidega on nüüd võimalik läbi viia võrdlemisi väikse ressursikuluga – seda nii ajalises kui ka rahalises perspektiivis ning lõpliku seadistuse saavutamine on nüüd võimalik suures osas tänu reaalajasimulatsioonidele. Seejuures ei ole aga selliste reaalajasimulatsioonide läbiviimine veel Eestis laialt levinud – simulaatorid on võrdlemisi kallid ning ei ole võrguettevõtete jaoks tingimata vajalikud. Tallinna Tehnikaülikooli mõne aasta eest soetatud reaalajasimulaator RTDS ning vahetult enne magistritöö kirjutamist soetatud Basler DECS-250 ergutusregulaator andsid autorile võimaluse koostada magistritöö raames ergutusregulaatori katsestend ning kontrollida ergutusregulaatori töö vastavust IEEE standardis 421.5 esitatud matemaatilisele mudelile.

Eesmärgi täitmiseks võttis autor aluseks varasemalt koostatud elektrivõrgu ning sünkroon-generaatori matemaatilise mudeli, mida autor modifitseeris vastavalt katsestendi vajadustele. Näiteks tuli mudelile lisada sisendid ja väljundid, mida kasutades toimus mõõteandmete vahendus reaalajasimulaatori ning teiste katsestendis kasutatavate seadmete vahel. Lisaks tuli kõrvaldada mõned varasemalt mudelis esinenud vead. Katsestendi olulisemateks komponentideks olid simuleeritud elektrivõrk ning sünkroongeneraator, mis olid läbi signaalivõimendite ühendatud ergutusregulaatoriga Basler DECS-250. Tagasisidena saadeti simulaatorisse mõõteandmed ergutusvoolu ja -pinge kohta simuleeritud ergutil, millena kasutati elektroonilist alalisvoolu-koormust – selline lahendus lihtsustas oluliselt ergutuspinge ja -voolu kohta mõõteandmete kogumist.

Reaalajasimulaatoris kasutatav elektrivõrgu mudel põhineb ühel reaalsel Eestis toimival ning neljast alajaamast koosneval elektrivõrgu osal. Pärast ergutusregulaatori ühendamist reaalajasimulaatoriga ja katsestendi korrektse töö kontrollimist viidi töös läbi kolm katset kahes seerias. Neist kõige raskekujulisem simuleeritud olukord kujutas endast 0,25 sekundi pikkuse kolmefaasilise lühise tekitamist 110 kV alajaama lattidel. Samuti teostati võrgupinge kõrvalekallete simuleerimine 10% ulatuses nimisuurusest üles- ja allapoole. Katsete teostamisel ja väljundi hindamisel lähtus autor kehtivast Võrgueeskirjast.

Pinge hüppelise tõstmise katse tulemusena järeldus, et pingeregulaatori reguleerimiskõver oli matemaatilise mudeli omale küll sarnane, ent Võrgueeskirjas sätestatud ülevõnke lubatud suurus ning reguleerimisvahemiku täitmiseks kulunud aeg said nii matemaatilise mudeli kui reaalse

pingeregulaatori puhul ületatud ning simuleeritud sünkroongeneraatori ühendamise võrku on seega välistatud.

Pinge hüppelise langetamise katsetusest nähtus, et matemaatilise mudeli tulem erines regulaatori reguleerimiskõverast suuremal määral ning reaalse ergutusregulaatori korral ülevõnget ei tekkinud. Sarnaselt esimesele katsetusele ei käitunud Võrgueeskirjale vastavalt ka matemaatiline mudel, ehkki ka seekord tegutses see regulaatorist kiiremini.

Võrgueeskirjale vastas aga kolmanda katse tulemus. Kolmandas katses tekitati 110 kV alajaama lattidel lühis. Nii matemaatiline mudel kui ka reaalne seade suutsid lühist taluda enam kui 0,25 sekundit ning pärast lühise möödumist taastada nimipinget nõutud sihttasemel. Seejuures läbisid katse edukalt nii matemaatiline mudel kui ka reaalne seade, kusjuures lühise järgne kõrgema pinget periood kestis matemaatilisel mudelil kauem, samas jäi lühise vältel matemaatilisel mudelil madalaimaks pinget tasemeks reaalsest regulaatorist veidi kõrgem väärtus.

Tulemustes võib leida sarnaseid jooni ka varasemate uurimustega, kus selgus samuti, et pingeregulaatori töö on väga sarnane selle matemaatilise mudeli omaga. Sarnaselt käesoleva lõputöö tulemustega on ka varasemas uurimuses täheldatud reaalse pingeregulaatori töö ajalist viibimist võrreldes matemaatilise mudeliga. Uurimuses pakuti ühe viite põhjusena välja andmete edastamiseks kulunud aeg simulaatori ja ergutusregulaatori vahel. Edasistes uurimustes tuleks ka lõputöös koostatud katsestendi puhul uurida mõõteandmete edastamisel tekkivat ajalist viidet.

Ehkki magistritöö tulemusena selgus, et ei matemaatilise mudeli ega reaalse pingeregulaatoriga teostatud pinget hüppelise muutmise katsete tulemused ei lubaks vastavalt kehtivale Võrgueeskirjale sünkroongeneraatorit elektrivõrku ühendada, puuduvad töö autoril andmed reaalistest katsetustest. Reaalsete katsetulemuste puudumise tõttu võib eeldada et kasutada olnud sünkroongeneraatori mudelis esinevad ebatäpsused; samuti võis reaalse generaatoriga teostatud katsete tulemusena osutada vajalikuks pingeregulaatori sätete muutmine.

Magistritöö eesmärk katsestendi koostamise ja selle abil katsetuste läbiviimise näol sai autori arvates edukalt täidetud. Ergutusregulaatori ja selle matemaatilise mudeli pingekõverad olid kõikide katsete puhul suhteliselt sarnased ja seeläbi võib öelda, et matemaatiline mudel on sobiv reaalse seadme töö piisavalt täpseks hindamiseks. Katsestendi korrektse töö saavutamisel osutus suurimaks väljakutseks erguti simuleerimine – olgugi, et töös kasutatav elektrooniline alalisvoolukoormus töötas eesmärgipäraselt, oli raskusi reaalajasimulatsioonis koormuselt mõõdetud pingelangu korrektse skaleerimisega.

Kindlasti tasuks järgnevates uurimustes pöörata tähelepanu pilooterguti simuleerimise võimalustele. Näiteks tasuks kaaluda võimalust simuleerida ka pilootergutit reaajasimulaatoris, ning võimendada simulaatori väljundsignaali selliselt, et seda oleks võimalik kasutada ergutusregulaatori toiteks. See avaks võimaluse uurida, kui suurt mõju omab näiteks sünkroonmasina sageduse võnkumine ergutuspingele.

Lõputöö ülesande laiendamine annaks autori arvates ainet ka järgnevatele magistritöödele. Näiteks oleks võimalik detailsemalt uurida teiste, juba valminud või lähitulevikus võrku lülitatavate generaatorite ergutusregulaatorite tööd, seda loomulikult eeldusel, et ergutusregulaatorid pärinevad samalt tootjalt. Vastasel korral tuleks kasutada ka katsestendis teistsugust ergutusregulaatorit. Katsestendi kasutamine oleks võimalik siduda ka erinevate elektroenergeetika õppekavas sisalduvate õppeainete sisuga. Näiteks võiks uurida ergutusregulaatori töö koordineerimist teiste releekaitseseadmetega.

Magistritöö autori arvates on tegemist valdkonnaga, mida tasub edaspidi kindlasti sügavamalt uurida ning loodetavasti avab käesolevas töös loodav katsestend võimaluse Tallinna Tehnikaülikoolis uute ja põnevate elektrisüsteemi stabiilsust puudutavate teemade uurimiseks.

SUMMARY

Several developments regarding electrical systems modelling and efficiency of real-time simulations that have occurred during recent decades have laid a foundation for developing a capable tool that simplifies the procedure of checking generator's compliance with the requirements of respective legislation. Previous tests with physical machinery can now be conducted with much less effort and resources, both in financial and timely sense – accomplishing final settings can now be done with real time simulations. However, performing real time simulations is not very common in Estonia – simulators are rather expensive and may not be crucial for transmission system operators. As both real time digital simulator and excitation control system were present in TalTech, author obtained an opportunity to write a Master thesis with the aim to compose a test bed for excitation control system along with validating its performance against mathematical model presented in IEEE standard 421.5.

In order to fulfil the purpose, author of the thesis relied on the previously composed mathematical model of the power grid and synchronous generator. The model was modified according to the needs of requirements of the test bed. For example, input and output for external devices had to be added. In addition, some errors that were present in the initial model had to be eliminated. The most important components of the test bed were the simulated power grid and synchronous generator which were connected with the excitation control system Basler DECS-250 through signal amplifiers. Feedback about the field voltage and current was sent to simulator using an electronic DC load, which was used to simulate the exciter.

Grid model used in the simulation is based on a part of existing grid, consisting of 4 electrical substations, currently functioning in Estonia. After connecting the excitation control system to real-time digital simulator, 3 tests were carried out in 2 series. The most severe of these was the simulation of single-phase short-circuit for 0.025 seconds on the 110 kV substation's busbars. Also, a 10% voltage setpoint deviation (both up and down) was simulated. In the process of performing tests and interpreting the outcome, author relied on current legislation.

In terms of voltage momentary growth, regulation curve of voltage regulator was rather similar to mathematical model, however terms described in legislation were violated and therefore connecting the simulated generator to power grid is not permitted.

From the results of voltage setpoint lowering test it appeared that the outcome of mathematical model was more different from regulator's curve and overshoot did not occur with real excitation control system. As in the first test, both mathematical model and the regulator breached the terms of legislation, although as before, it performed faster than the real excitation control system.

Outcome of the third test was in line with legislation. Short circuit was simulated on the busbars of 110 kV electrical substation. Both mathematical model and the device were able to tolerate the short-circuit for more than 0.025 seconds and after its occurrence both the device and its mathematical model were able to recover nominal voltage on required target level. Therefore, both of them passed the test successfully. However, the lowest voltage value during voltage drop was higher in case of mathematical model.

Outcomes of the thesis have some similar lines with previous researches – the voltage curves of a real regulator were very similar to the ones of the mathematical model. As in current thesis, previous researchers have also noticed some delays in the performance of the real excitation control system. To verify the source of these delays further research should be carried out regarding this matter.

Although it appeared that according to the tests, neither the real excitation control system nor its mathematical model could be integrated to the power grid, there is no information on real tests in the possession of the author. This means that some imperfections may be present in the generator model also it could have been necessary to change the settings of the excitation system in real tests.

All in all, in author's opinion, the goal of the thesis – composing a test bed was successfully accomplished. The voltage curves of the regulator and its mathematical model were quite similar and therefore it could be concluded that the mathematical model could be used for estimating the performance of the real device. The most challenging part in order to achieve proper work of the test bed was simulating the exciter – although the electronic load performed properly, some problems arose from correct scaling of voltage measured on the electronic load.

In the author's opinion, further research could focus on the simulation of the pilot exciter. For example, one could consider simulating the pilot exciter in RTDS and use an amplifier to supply power to the excitation control system. By doing this the effect of frequency oscillations on the excitation power could be examined.

Extension of the thesis topic would give ground to further research. For example, it would be possible to examine the performance of existing or planned power plants' generators in more detail, assuming that the power stations utilize the same type of excitation control systems. Otherwise the test bed should be adapted accordingly. The test bed could also be used in university's curriculums. For example, the coordination of excitation control and protection relays could be investigated.

In author's opinion the field of research is fascinating and hopefully opens new opportunities to carry out research in TalTech.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] P. Kundur, „Power System Stability and Control,“ McGraw-Hill, Inc., New York, 1993.
- [2] M. Meldorf ja J. Kilter, Elektrisüsteemi stabiilsus, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2011.
- [3] T. Van Cutsem ja C. Vournas, Voltage Stability of Electric Power Systems, Springer Science & Business Media, 2007.
- [4] M. Gibbard, P. Pourbeik ja D. Vowles, Small-signal Stability, Control and Dynamic Performance of Power Systems, Adelaide: University of Adelaide Press, 2015.
- [5] K. Janson ja A. Kallaste, Elektrimasinate alused, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2017.
- [6] Vabariigi Valitsus, „Võrgueeskiri,“ 11 08 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/111082015004>. [Kasutatud 18 05 2019].
- [7] Basler Electric, „Instruction Manual for DECS-250 Digital Excitation Control System,“ Basler Electric, 2018.
- [8] IEEE Power Engineering Society, „IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies,“ 2005. [Võrgumaterjal]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1626480>. [Kasutatud 15 04 2019].
- [9] A. Grono ja J. Wlodarski, „Setting and Testing Automatic Generator Synchronizers,“ *IEEE Computer Applications in Power*, pp. 38-40, 1999.
- [10] R. Isermann, J. Schaffnit ja S. Sinsel, „Hardware-in-the-loop simulation for the design and testing of engine-control systems,“ *Control Engineering Practice*, kd. 7, pp. 643-653, 1999.
- [11] T. Hwang, J. Roh, K. Park, J. Hwang, K. H. Lee, K. Lee, S.-j. Lee ja Y.-j. Kim, „Development of HILS Systems for Active Brake Control Systems,“ %1 *2006 SICE-ICASE International Joint Conference*, Busan, 2006.
- [12] T. A. Johansen, T. I. Fossen ja B. Vik, „Hardware-in-the-loop Testing of DP systems,“ %1 *Dynamic Positioning Conference*, Houston, 2005.
- [13] C. Goldemberg, E. L. Pellini ja S. Ura, „Real time simulator for hydro-generator excitation systems,“ %1 *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Montreal, 2006.
- [14] F. R. Blázquez, E. Rebollo, F. Blázquez ja C. A. Platero, „Real Time Power Plant Simulation Platform for training on Electrical Protections and Automatic Voltage Regulators,“ %1 *12th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Wroclaw, 2013.
- [15] H. T. Nguyen, G. Yang, A. H. Nielsen ja P. H. Jensen, „Hardware-in-the-Loop Test for Automatic Voltage Regulator of Synchronous Condenser,“ %1 *Proceedings of 20th International Conference on Power Systems and Energy Conversion*, 2018.
- [16] D. Kabanov, A. Kushnir, Y. Shtefka ja Z. A.S., „Obtaining frequency response of automatic voltage regulators and power system stabilizers in closed loop system using Real Time Digital Simulator,“ *RTDS News*, 2015.

- [17] M. Almas, L. Vanfretti ja L. Vanfretti, „Experimental performance assessment of a generator's excitation control system using real-time hardware-in-the-loop simulation,“ %1 *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Dallas, 2014.
- [18] M. Almas ja L. Vanfretti, „RT-HIL testing of an excitation control system for oscillation damping using external stabilizing signals,“ %1 *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Denver, 2015.
- [19] L. Meng, S. Yang, L. Wang, Y. Liu ja F. Peng, „Hardware-In-Loop Test for Automatic Voltage Regulator based on Identification Model,“ %1 *15th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Novi Sad, 2012.
- [20] T. Sarnet, „Elektrijaama ja elektrivõrgu mudel programmis RSCAD (TTÜ sisedokument),“ Tallinn, 2019.
- [21] P. M. Meshram ja R. G. Kanojiya, „Tuning of PID controller using Ziegler-Nichols method for speed control of DC motor,“ %1 *IEEE- International Conference On Advances In Engineering, Science And Management*, Nagpur, 2012.
- [22] RTDS Technologies Inc., „REAL TIME POWER SYSTEM SIMULATION,“ 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.rtds.com/real-time-power-system-simulation/>. [Kasutatud 22 05 2019].
- [23] RTDS Technologies Inc., „GTIO cards,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.rtds.com/the-simulator/our-hardware/gtio-cards/>. [Kasutatud 02 04 2019].
- [24] Analog devices, „AD669 Monolithic 16-Bit DACPORT,“ Analog devices, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad669.pdf>. [Kasutatud 02 04 2019].
- [25] L. Kütt, „Mittetavapärased mõõtemuundurid (NCIT) ning tehnilised tingimused nende rakendamiseks Eesti elektrivõrguettevõttes,“ Tallinna Tehnikaülikool Elektrotehnika instituut, Tallinn, 2012.
- [26] Omicron Electronics, „CMS 356,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.omicronenergy.com/en/products/cms-356/#contact-menu-open>. [Kasutatud 22 05 2019].
- [27] EA-Elektro-Automatik GmbH & Co. KG, „Operating Manual EL 9000 B HP Electronic DC Load,“ www.elektroautomatik.de, Viersen, 2017.
- [28] ELFA DISTRELECT, „EA-EL 9200-35 B HP 2U - Electronic Load 200V 35A 1kW, Elektro-Automatik“.
- [29] RTDS Technologies Inc., „RSCAD Controls Library Manual,“ Manitoba, 2018.
- [30] A. L. M. Coelho, P. M. Silveira ja F. R. A. C. Baracho, „A Test-Bed for Protection Studies of Synchronous Generators and its Interaction with the Underexcitation and Overexcitation Limiters,“ %1 *2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, Portland, 2018.
- [31] Omicron Electronics, CMS 356 Reference manual, Omicron Electronics.
- [32] L. S. Sterling, *The Art of Agent-Oriented Modeling*, London: The MIT Press, 2009.

LISAD

RTDS-i simulatsioonis suuruste skaleerimine

Katsestendi kasutamisel on kasulik omada ülevaadet katsestendi erinevate osade seadistamisest ning katsestendi sisend- ja väljundsuuruste õigest skaleerimisest. Lõputöö esimeses lisas kirjeldataksegi töö kirjutamise käigus tehtud tähelepanekutest ja omandatud kogemustest, mis võivad järgmiste katsestendi kasutajate tööprotsessi lihtsustada.

Simulatsiooni väljundsuuruste skaleerimiseks on sisuliselt tarkvaras RSCAD vaja määrata, mitme primaarühiku suurune mõõtetulemus simulatsioonis tekitab analoogväljundkaardi GTA0 väljundkanalisse pinge maksimaalväärtuse 5 V.

Simulatsiooni väljundsuuruste skaleerimise juures on vaja teada järgnevat:

1. RTDS analoog väljundkanalite pinge amplituudväärtuse suurus, milleks on 5 V [29];
2. Omicron Electronics CMS 356 signaalivõimendi sisendkanalite pinge amplituudväärtust 7,071 V [31];
3. Omicron Electronics CMS 356 signaalivõimendi väljundi faasipinge amplituudväärtust 7,071 V sisendpinge amplituudväärtuse juures (424,26 V) [31];
4. Omicron Electronics CMS 356 signaalivõimendi väljundvoolu amplituudväärtust 7,071 V sisendpinge amplituudväärtuse juures (45,25 A) [31];
5. Pingeregulaatori seadistustes kasutatavaid mõõtetrafode sekundaarpinge ja -voolu väärtusi (käesolevas töös olid antud väärtusteks 100 V ja 5 A).

Järgnevalt antakse ülevaade protsessist, mille kaudu lõputöö autor leidis kasutatavad skaleerimistegurid.

Generaatori nimifaasipinge leidmine:

$$U_f = \frac{U_l}{\sqrt{3}} = \frac{6,3}{\sqrt{3}} = 3,64 \text{ kV} \quad \text{L.1.1}$$

Nimifaasipinge amplituudväärtuse leidmine:

$$U_m = U_f \cdot \sqrt{2} = 5,14 \text{ kV} \quad \text{L.1.2}$$

Analoogselt eelnevale valemile (L.1.2) leitakse Omicron võimendi väljundi faasipinge amplituudväärtus, milleks on 424,26 V. Järgnevalt leitakse valemite L.1.1 ja L.1.2 põhjal pingetrafode faasipinge amplituudväärtus, milleks on 81,65 V. Saadud tulemuste põhjal on ilmne, et Omicroni võimendi sisendisse ei saa anda 7,071 V amplituudväärtusega signaali, vaid sisendsignaali tuleb väiksemaks skaleerida vastavalt saadud tulemustele $424,26 / 81,65 = 5,20$ korda. See tähendab, et sisendpinge amplituudväärtuseks võib olla maksimaalselt 1,36 V. Sellest saab järeldada, et ka reaajasimulaatori väljundpinge amplituudväärtus peab olema maksimaalselt 1,36

V, mis tähendab, et generaatori faasipinge 5,14 kV võib tekitada väljundkanalisse kõigest 1,36 V pinge, ehk 5V väljundpinge tekitamiseks oleks vaja väljundkaardile simulatsioonist saata pinge, mis arvutatakse järgmiselt:

$$U_{GTAO} = 5,14 \cdot \frac{5}{1,36} = 18,9 \text{ kV}$$

Kindlasti tuleb hilisemate simulatsioonide käigus arvutustulemusi kontrollida, kas pinge, mida mõõdab ergutusregulaator on võrdne pingega, mida simulatsioon mõõdab generaatori lattidel. Vajadusel tuleb teha väiksemaid täpsustusi – näiteks tuli lõputöö autoril ergutusregulaatori mõõtetulemuste korrigeerimiseks hiljem GTA0 kaardi skaleerimistegurit langetada 18,02-ni.

Järgmise punktina seatakse skaleerimistegurid samalaadse algoritmi alusel ka voolu väljastavatele RTDS-i analoogväljundkanalitele. Taaskord alustatakse lahenduskäiku ergutusregulaatori poolt, kuna regulaatoris on määratud voolutrafode suhe 800 / 5, näeb generaatori faasivoolu amplituudina 800 A, kui Omicroni võimendi väljundsignaali amplituud on 5 A. Võimendi sisendisse antava pinge amplituudväärtus on sel hetkel $5 / 45,25 * 7,071 = 0,781 \text{ V}$. See tähendab, et samasuguse amplituudväärtusega pingesignaali võib väljastada ka reaajasimulaator RTDS, ehk 0,8 kA (RTDS-i simulatsioonis on generaatori voolu primaarühikuteks kiloamprid) suurune generaatori voolu mõõtetulemus simulatsioonis tekitab väljundisse pinge 0,781 V. Sellest saab järeldada, et 5 V väljundsignaali saamiseks peab generaatori vool olema 5,12 kA, mis ongi esialgne skaleerimistegur. Ka selle teguri puhul tuli katsetuste käigus skaleerimistegurit täpsustada, võrdsete mõõtetulemuste saavutamiseks ergutusregulaatoris ja simulatsioonis langetati skaleerimistegur hiljem 5,11 peale.

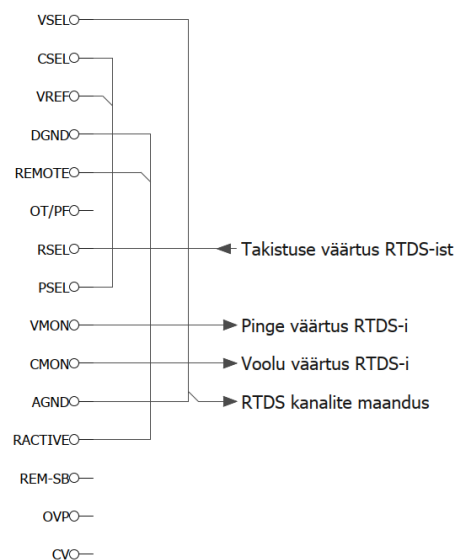
Lisaks voolu ja pinge mõõtmistele väljastatakse reaajasimulaatorist analoogväljundkanali kaudu ergutusmähise takistuse väärtus, mis on sisendiks elektroonilisele koormusplokile. Nende signaalide skaleerimine on lihtsam, kuna elektroonilise koormusploki menüüst on võimalik valida sisendsignaali referentspinge amplituudväärtusena 5 V, siis 5 voldine takistuse väljundsignaal tekitab koormusplokis selle maksimaalse võimaliku takistuse, ehk 170 Ω. Sama väärtus sisestatakse ka GTA0 kaardi skaleerimisteguriks. Samalaadselt on võimalik määrata ka koormusploki pinge ja voolu skaleerimistegurid, sõltuvalt sellest, millises režiimis koormust hetkel kasutada tahetakse. Järgmise punktina tuleks vaadata üle koormusplokilt mõõdetud pinge ja voolu väärtuste skaleerimine, nende puhul saab käituda analoogselt koormusele saadetavate signaalidega. See tähendab, et skaleerimisteguriks saab määrata ploki nimiandmed:

1. $U_{NOM}=200 \text{ V}$;
2. $I_{NOM}=35 \text{ A}$;
3. $R_{NOM}=170 \text{ } \Omega$.

Koormusploki analoogpistiku ühendamine

Järgmisena vaadeldakse elektroonilise koormuse kasutamist erinevates töörežiimides. Vastavalt sellele, millises režiimis tahetakse koormusplokki kasutada, tuleb selle kaugjuhtimiseks kasutatavas analoogpistikus olevad kontaktid ühendada erinevalt. Pistikus on kokku 15 erinevat kontakti ning käesolevas lisas antakse kasutamise lihtsustamiseks skeemid koormusploki kasutamiseks konstantse pinge, voolu ja takistuse režiimis. Seadme lihtsamaks kasutamiseks erinevates konfiguratsioonides on elektroonilise koormusploki sisendpistiku kõik kontaktid ühendatud katsestendi paigaldatud klemmliistu. Loomulikult oleks võimalik mõned klemmid juba pistiku siseselt omavahel sillata, kuid see tähendaks iga töörežiimi jaoks eraldi pistiku jootmist, mida autor proovis vältida.

Lõputöö käigus kasutati koormust konstantse takistuse (CR) režiimis, see tähendab, et koormus saab reaajasimulatsioonist signaali, mis määrab, millise suurusega takistust koormusplokk ergutusregulaatorile kujutama peab. Alltoodud joonisel on antud analoogpistiku ühendusskeem konstantse takistuse režiimis kasutamiseks.

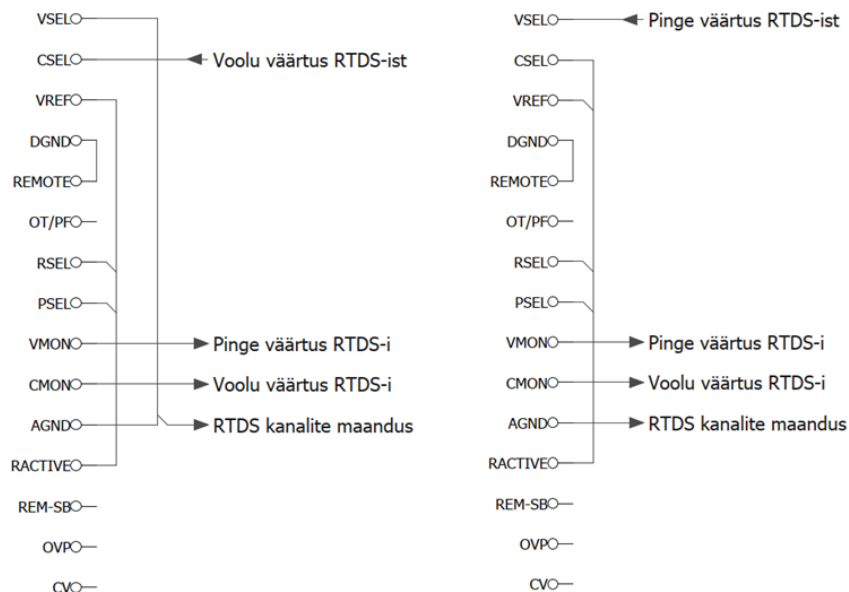


Joonis L. 1. Alalisvoolukoormuse Elektro-Automatik EL 9200-35B analoog kaugjuhtimispistiku kontaktide ühendusskeem konstantse takistuse režiimis kasutamiseks

On oluline jälgida, et signaalid, mida antud ajahetkel ei kasutata seadme juhtimiseks, oleksid seotud kindla potentsiaaliga punktiga – seadme kasutusjuhend keelab neid ühendamata jätta [27]. Soovituslik on vabaks jäävad kontaktid ühendada klemmiga, mis määrab seadme referentspinge (Joonis L. 1. VREF). Ka jooniselt on näha, et klemmid CSEL ja PSEL millega saab määrata vastavalt koormuses voolava voolu ja võimsuse, on hetkel ühendatud klemmiga VREF. See tähendab, et neile klemmidele on rakendatud pinge 5 V. Seadme menüüst on võimalik valida referentspinge väärtuseks ka 10 V, kuid RTDS- simulaatoriga kasutamiseks on mugavam kasutada 5 V

referentspinget, kuna GTAO kaart väljastab sama suure amplituudväärtusega signaali ning sellest tulenevalt on skaleerimistegurite seadmine lihtsam. Klemmiga VSEL, mis määrab, kui suur pingelang takistusel tekib, on olukord veidi keerulisem. Kui seadet soovitakse kasutada näiteks konstantse voolu, takistuse või võimsuse režiimis, siis peab klemmi VSEL sildama klemmiga AGND, vastasel korral hakkab seade tööle konstantse pingelangu režiimis.

Järgnevalt tuuakse välja ka ühendusviisid alalisvoolukoormuse kasutamiseks konstantse pingelangu ja konstantse voolu režiimis, vastavad skeemid on kujutatud alljärgneval joonisel (Joonis L. 2).



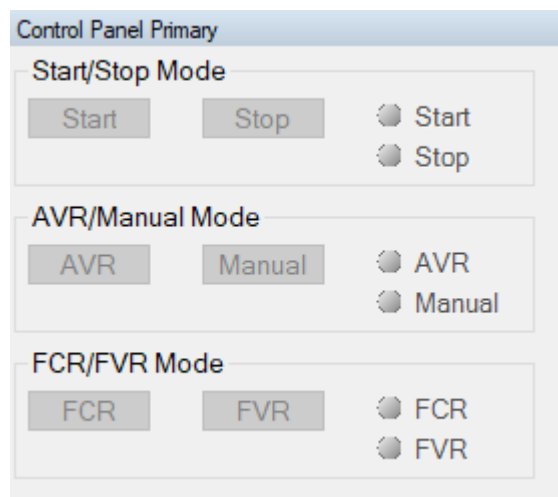
Joonis L. 2. Alalisvoolukoormuse Elektro-Automatik EL 9200-35B analoog kaugjuhtimispistiku kontaktide ühendusskeem konstantse voolu (vasakul) ja konstantse pingelangu (paremal) režiimis kasutamiseks

Jooniselt nähtub, et konstantse voolu režiimis kasutamiseks on seadme ühendusskeem väga sarnane konstantse takistuse režiimis kasutamiseks vajalikule skeemile, sama võib öelda ka konstantse võimsuse režiimis kasutamiseks loodud skeemi kohta. Konstantse võimsuse režiimis töötamiseks tuleb ühendada CSEL ja RSEL klemmid VREF klemmiga ning CSEL klemm RTDS – simulaatori väljundkanaliga, ühenduste sarnasuse tõttu ei ole selle režiimi kohta skeemi siinkohal välja toodud. Konstantse pingelangu režiimis kasutamiseks on vaja kontakt VSEL kontakti AGND küljest lahti ühendada, ning anda VSEL kontaktile signaal RTDS-väljundkaardilt. Skeemidel ühendamata jäetud klemmid kujutavad endast kas seadme või seadme alarmide staatust. Käesolevas töös neid ei kasutatud, kuid katsestendi edasiarenduste juures tasuks nende kasutamist kaaluda, näiteks annavad kontaktid OT/PF, OVP väljundisse kõrge signaali (>4 V) [27], kui seadmel on vastavalt ülekuumenemise, toite katkemise või ülepinge häire. Kontakt CV annab väljundisse kõrge signaali, kui seade on CC, CR, või CP režiimis, CV režiimis on kontaktil madal signaal (<1 V) [27]. Käesolevas töös seda ei kasutatud, kuna alalisvoolukoormus asus otse RTDS-i kõrval ning töörežiimi oli võimalik jälgida seadme ekraanilt.

Basler DECS-250 kasutamine

Lõputöö käigus juhiti ergutussüsteemi USB kaabli vahendusel, USB pistik asub seadme esipaneelil. Kui seadmega on USB kaabli abil ühendus loodud, on võimalik tootja tarkvara BESTCOMS Plus kasutades vaadata ja muuta kõiki ergutusregulaatorit puudutavaid sätteid, samas programmis on võimalik koostada ka erinevaid seadmesiseseid loogikaskeeme. Lisaks saab muuta erinevate väljundkontaktide funktsioone, sama programmi abil on võimalik ka reaalajas jälgida generaatori ja võrgu pingemõõtmiste tulemusi ning generaatori voolu väärtust.

Regulaatori seadistamisel siinkohal pikemalt ei peatuta, selleks on mõistlik kasutada seadme kasutusjuhendit [7]. Tarkvara on suhteliselt lihtsasti käsitsetav ning kasutajasõbralik. Kui seade on õigesti seadistatud, siis ongi katsestendi puhul tarkvara peamiseks eesmärgiks mõõteandmete edastamine kasutajale ja ergutusregulaatori katsetusteks sisse ja välja lülitamine (vt. Joonis L. 3).



Joonis L. 3. Ergutusregulaatori sisse ja välja lülitamise võimalus tarkvaras BESTCOMS Plus

Ülaltoodud joonisel on toodud osa tarkvara kasutajaliidesest, nagu näha, on regulaatori sisselülitamine suhteliselt lihtne. Siiski tasuks selle katseseadme puhul enne nupule Start vajutamist veenduda, et seade töötaks automaatse pingeregulaatori (AVR) režiimis, ning referentspinge väärtus oleks õige – (konkreetses modelleeritud generaatori puhul 6300 V).