



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**MITME TOOTMISÜKSUSEGA
ELEKTRIPAIGALDISE JUHTALGORITMIDE
ARENDAMINE SÜSTEEMITEENUSTE
PAKKUMISEKS JA SAARTALITLUSE VÕIME
TAGAMISEKS**

**DEVELOPMENT OF CONTROL ALGORITHMS FOR
MULTIPLE UNIT GENERATING FACILITY TO PROVIDE
SYSTEM SERVICES AND ENABLE ISLAND OPERATION
CAPABILITY**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Hendrik Kiristaja

Üliõpilaskood: 192328AAVM

Juhendajad: Jako Kilter, professor

Tarmo Trummal, nooremteadur

Tallinn 2021

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.

"....." 202.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"....." 202.....

Juhendajad:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Hendrik Kiristaja

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Mitme tootmisüksusega elektripaigaldise juhtalgoritmide arendamine süsteemiteenuste pakkumiseks ja saartalitluse võime tagamiseks“, mille juhendajad on Jako Kilter ja Tarmo Trummal

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

18.05.2021

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Hendrik Kiristaja

Lõputöö liik: Magistritöö

Töö pealkiri: Mitme tootmisüksusega elektripaigaldise juhtalgoritmide arendamine süsteemiteenuste pakkumiseks ja saartalitluse võime tagamiseks

Kuupäev: 18.05.2021

139 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendajad: professor Jako Kilter, nooremteadur Tarmo Trummal

Töö konsultant: nooremteadur Tanel Sarnet

Sisu kirjeldus: Käesoleva lõputöö eesmärgiks on välja töötada juhtalgoritmide süsteemiteenuste pakkumiseks, elektripaigaldise liitumispunkti läbivate võimsusvoogude reguleerimiseks ja saartalitluse võime tagamiseks. Lõputöös keskendutakse tehnilistele lahendustele, mille rakendamine võimaldab vähendada elektripaigaldise investeringu- ja käidukulusid ning ühtlasi tõsta selle lisandväärtust.

Tehnilised lahendused töötati välja ühe Eesti tööstusettevõtte elektrivõrgu alusel, mida modelleeriti elektrisüsteemi reaalarajasimulaatoril RTDS. Olemasolevasse elektrivõrku lisati perspektiivsed tootmisüksused. Juhtalgoritmide arendamise esimeses etapis koostati võimalikud lahendused reaalarajasimulaatoril. Teises etapis täiendati juhtalgoritmide tööstuskontrolleril National Instruments CompactRIO. Välja töötatud tehnilisi lahendusi kontrolliti katseliselt.

Katsete tulemused näitasid, et lõputöö on täitnud eesmärgi. Välja töötatud juhtalgoritmide ja tööstuskontrollerite on võimalik kasutada elektripaigaldise juhtimiseks süsteemiteenuste pakkumisel, liitumispunkti läbivate võimsusvoogude reguleerimisel ja saartalitluse juhtimisel. Majanduslik analüüs näitas, et nii süsteemiteenuste pakkumine kui ka investeringukulusid vähendava paindliku liitumise võimaluse kasutamine on tasuvad. Selgus, et liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse reguleerimisel on tööstuskontrolleri tasuvusaeg alla aasta ja saartalitlusel mõned tunnid.

Lõputöö tulemuseks on juhtalgoritmide, mida tööstuskontrolleriga rakendades on võimalik kasutada erinevate elektripaigaldiste juhtimiseks.

Märksõnad: akupank, generaator, kontroller, päikeseelektrijaam, reaalarajasimulaator, saartalitlus, süsteemiteenused, tuuleelektrijaam

ABSTRACT

Author: Hendrik Kiristaja

Type of the work: Master Thesis

Title: Development of control algorithms for multiple unit generating facility to provide system services and enable island operation capability

Date: 18.05.2021

139 pages

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisors of the thesis: Professor Jako Kilter, Early Stage Researcher Tarmo Trummal

Consultant: Early Stage Researcher Tanel Sarnet

Abstract: The objective of this Master's thesis is to develop control algorithms for the provisioning of system services, the regulation of power flows through the electrical installation connection point and the enabling of island operation. This thesis focuses on technical solutions that enable the reduction of installation and operational costs of an electrical installation while increasing its value.

Technical solutions were developed based on an Estonian generating facility which was modelled with real-time simulator RTDS. Prospective generating units were added to the existing network. In the first stage of the development of control algorithms, possible solutions were compiled with RTDS. In the second stage the control algorithms were adapted for the National Instruments CompactRIO industrial controller. The developed technical solutions were tested.

The results confirm that the objectives of this thesis were achieved. The developed control algorithms and the industrial controller can be used for the provisioning of system services, the regulation of power flows through the electrical installation connection point and the enabling of island operation. The economic analysis showed that both the provisioning of system services and the utilizing of cost-efficient flexible connection are economically viable. The payback period of the controller when regulating power flows is less than a year and only few hours when enabling island operation.

In this thesis control algorithms were developed that in conjunction with an industrial controller can be used to control different electrical installations.

Keywords: battery, generator, controller, solar power plant, real-time simulator, island operation, system services, wind power station

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Mitme tootmisüksusega elektripaigaldise juhtalgoritmide arendamine süsteemiteenuste pakkumiseks ja saartalitluse võime tagamiseks
Lõputöö teema inglise keeles:	Development of control algorithms for multiple unit generating facility to provide system services and enable island operation capability
Üliõpilane:	Hendrik Kiristaja, 192328AAVM
Eriala:	Elektroenergeetika
Lõputöö liik:	Magistritöö
Lõputöö juhendaja:	Professor Jako Kilter
Lõputöö kaasjuhendaja:	Nooremteadur Tarmo Trummal
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	15.06.2021
Lõputöö esitamise tähtaeg:	18.05.2021

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Energiasüsteemid on muutumises. Elektrisüsteemide juhtimisel liigutakse järjest enam turupõhimõtetele baseeruvatele lähenemisviisidele. See tähendab, et süsteemiteenuseid saavad lisaks suurtele elektrijaamadele ja võrguhalduri enda seadmetele pakkuda ka teised elektrivõrguga liitunud elektripaigaldised. Süsteemiteenuste pakkumine võimaldab tõsta nende lisandväärtust.

Investeeringukulude vähendamiseks on võimalik kasutada Elering AS-i paindliku liitumise tingimusi. Tingimused sätestavad, et uus liituja ei pea tasuma ülekandevõrgu tugevdamise tasusid, kuid ülekandevõrgu operaatorile jäetakse võimalus vajadusel piirata elektripaigaldise ja ülekandevõrgu vahelist võimsusvoogu. Käidukulude minimeerimise üheks võimaluseks on sobilike juhtalgoritmidega elektripaigaldise saartalitluse võime tagamine.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on ühe Eesti tööstusettevõtte elektrivõrgu alusel välja töötada sobilikud juhtalgoritmid, millega tagatakse süsteemiteenuste pakkumise, liitumispunkti läbivate võimsusvoogude reguleerimise ja saartalitluse juhtimise võime.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Käsitleva tööstusettevõtte elektrivõrgu ja sinna lisatavate erinevate tootmisüksuste (sünkroongeneraator, elektrituulik, päikesepaneel, aku) modelleerimine elektrisüsteemi reaalarajasimulaatoril RTDS;
- Elektripaigaldisele sobilike juhtalgoritmide arendamine süsteemiteenuste pakkumiseks;
- Elektripaigaldisele sobilike juhtalgoritmide arendamine liitumispunkti läbivate võimsusvoogude reguleerimiseks, sh paindliku liitumise võimaldamiseks;
- Elektripaigaldisele sobilike juhtalgoritmide arendamine saartalitluse võimaldamiseks;
- Juhtalgoritmide rakendamine tööstuskontrolleriga;
- Koostatud juhtalgoritmide rakendamise majandusliku mõju uurimine.

4. Lähteandmed

Töö teostamise lähteandmed saadakse tööstusettevõttest, teadusartiklitest, raamatutest, tootjate infomaterjalidest, võrguettevõtjate dokumentidest ja muust asjakohasest kirjandusest.

5. Uurimismeetodid

Lõputöös esitatakse kirjanduse alusel ülevaade elektrisüsteemi süsteemiteenustest ja elektrienergia tootmistehnoloogiast. Käsitleva tööstusettevõtte elektrivõrgu modelleerimiseks ja juhtalgoritmide arendamiseks kasutatakse elektrisüsteemide reaalarajasimulaatorit. Koostatud juhtalgoritmide testitakse National Instrumentsi tööstuskontrolleriga CompactRIO.

6. Graafiline osa

Olulisemad joonised elektrivõrgu mudeli, juhtalgoritmide ja katsete tulemuste kohta esitatakse lõputöö põhiosas.

7. Töö struktuur

- Sissejuhatus
- Elektrisüsteemi süsteemiteenused
- Elektrienergia tootmistehnoloogiad
- Elektrivõrgu mudeli ja juhtalgoritmide ülesehitus reaalarajasimulaatoril
- Juhtalgoritmide ülesehitus tööstuskontrolleril
- Koostatud juhtalgoritmide rakendamise tulemused
- Kokkuvõte

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Töös kasutatakse järgevaid allikaid:

- Teadusartiklite andmebaasid IEEEExplore ja ScienceDirect ning muud analoogsed andmebaasid
- P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, 1994, 1200 pp.
- M. Meldorf, J. Kilter, *Elektrisüsteemi stabiilsus*, TTÜ, 2011, 346 lk.
- G. Andreesen, „Elektrijaama generaatorite reaktiivvõimsuste juhtimissüsteemi arendamine ja selle katsetamine reaalarajasimulaatoriga“, [Magistritöö], Inseneriteaduskond, TalTech, Tallinn, Eesti, 2020.
- Võrguettevõtjate infoallikad
- Muud asjakohased teadusartiklid, käsiraamatud ja infoallikad

9. Lõputöö konsultandid

Nooremteadur Tanel Sarnet – abi tootmisüksuste modelleerimisel RTDS-is.

10. Töö etapid ja ajakava

- Kirjanduse läbitöötamine ja analüüs (november 2020 – jaanuar 2021)
- Teoreetilise osa kirjutamine (detsember 2020 – veebruar 2021)
- Katsemudelite loomine ja testimine (jaanuar 2021 – märts 2021)
- Katsetuste teostamine (veebruar 2021 – märts 2021)
- Katsetulemuste kirjeldamine ja analüüs (märts 2021 – aprill 2021)
- Järelduste kirjutamine (aprill 2021)
- Kokkuvõtte kirjutamine (mai 2021)
- Juhendajale esimeseks lugemiseks saatmine (05. mai 2021)
- Paranduste sisseviimine
- Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine (13. mai 2021)
- Töö lõplik versioon valmis (18. mai 2021)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	12
SISSEJUHATUS	13
1. ELEKTRISÜSTEEMI SÜSTEEMITEENUSED	16
1.1 Sagedusega seotud süsteemiteenused.....	16
1.2 Pingega seotud süsteemiteenused	20
1.3 Muud süsteemiteenused	22
2. ELEKTRIENERGIA TOOTMISTEHNOLOGIAD	24
2.1 Sünkroongeneraatorid	24
2.2 Elektrituulikud	28
2.3 Päikeseelektrijaam	31
2.4 Akupank	33
2.5 Pingemuunduritel põhinevad sagedusmuundurid.....	35
3. MUDELI JA JUHTALGORITMIDE ÜLESEHITUS REAALAJASIMULAATORIS	40
3.1 Reaalajasimulaatori ülevaade	40
3.2 Käsitletava tööstusettevõtte elektrivõrgu ülevaade.....	41
3.3 Koostootmisjaama sünkroongeneraatori mudel.....	44
3.4 Tuuleelektrijaama mudel	46
3.5 Päikeseelektrijaama mudel.....	47
3.6 Akupanga mudel.....	48
3.7 Võimsuste jaotamise matemaatilised kriteeriumid	49
3.8 Juhtalgoritmide ülesehitus reaalajasimulaatoril	53
3.8.1 Juhtimissüsteemi abisüsteemide põhimõtted	54
3.8.2 Liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimine	60
3.8.3 Liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse reguleerimine	62
3.8.4 Sünkroongeneraatoriga saartalitlus	64
3.8.5 Sünkroongeneraatorita saartalitlus	65
4. JUHTALGORITMIDE ÜLESEHITUSE KIRJELDUS TÖÖSTUSKONTROLLERIL	66
4.1 Tööstuskontroller NI CompactRIO 9045	66
4.2 Reaalajasimulaatori ja tööstuskontrolleri vaheline andmeside	68
4.3 Juhtalgoritmide ülesehitus tööstuskontrolleril	70
4.3.1 Tööstuskontrolleril koostatud juhtalgoritmide abisüsteemide põhimõtted	70
4.3.2 Liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimine	75
4.3.3 Sagedusega seotud süsteemiteenused	77

4.3.4 Liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse reguleerimine ja pingega seotud süsteemiteenused.....	82
5. KOOSTATUD JUHTALGORITMIDE RAKENDAMISE TULEMUSED	85
5.1 Liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimise katsete tulemused	85
5.2 Liitumispunktis reaktiivvõimsuse reguleerimise katsete tulemused	89
5.3 Saartaliluse katsete tulemused	98
5.4 Sagedusega seotud süsteemiteenuste katsete tulemused	104
5.5 Pingega seotud süsteemiteenuste katsete tulemused	113
5.6 Majanduslik analüüs.....	118
5.6.1 Sagedusega seotud süsteemiteenuste pakkumine.....	118
5.6.2 Paindliku liitumise võimaluse kasutamise tasuvus	121
5.6.3 Reaktiivenergia tasude vähendamine	123
5.6.4 Katkestustest põhjustatud kulude vähendamine	124
KOKKUVÕTE	125
KASUTATUD KIRJANDUS	129
LISAD	135
Lisa 1 Saartaliluse lisakatsete tulemused	136

EESSÕNA

Magistritöö arenes välja ühest Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi projektist. Liitusin projektiga kuna olen spetsialiseerunud automaatikale, mistõttu pakkus ülesanne erialast huvi ja arendas edaspidi kasuks tulevaid oskusi. Soovin tänada professor Jako Kilterit, kes võimaldas mul projektiga tegeleda. Samuti tänan nooremteadur Tarmo Trummalit, kes aitas reaalajasimulaatori ja tööstuskontrolleri tööks ette valmistamisega. Tänan ka nooremteadur Taneli Sarnetit juhiste eest, kuidas reaalajasimulaatoril elektrisüsteeme ja selle elemente modelleerida.

SISSEJUHATUS

Tänapäeva energiasüsteemid on muutumises – üha enam võetakse tootmiseseadmetena kasutusele päikese- ja tuuleelektrijaamasid, mis ühendatakse elektrivõrguga läbi jõuelektronikaseadmete. Eesti riiklikus energia- ja kliimakavas aastani 2030 (REKK 2030) [1] ning energiamajanduse arengukavas aastani 2030 (ENMAK 2030) [2] on välja toodud taastuvenergiaallikatest toodetud elektrienergia osakaalu eesmärgid lõpptarbimisest 2030. aastal. REKK 2030 on eesmärgiks seadnud 40% ja ENMAK 2030 vähemalt 30%. Päikese- ja tuuleenergia on muutliku iseloomuga energiaallikad. See toob kaasa aktiivvõimsuse tootmise ja tarbimise tasakaalu kõrvalekalded, mis mõjutavad elektrisüsteemi sagedust ja stabiilsust. Sellest tulenevalt liigutakse elektrisüsteemide juhtimisel turupõhimõtetele baseeruvatele lähenemisviisidele, kus kõrvalekallete kompenseerimiseks võivad süsteemiteenuseid suurte elektrijaamade ja ülekandevõrgu operaatori seadmete kõrval pakkuda ka teised elektrisüsteemiga liitunud elektripaigaldised. Neile tähendab see elektripaigaldise lisandväärtuse tõstmist.

Lisaks süsteemiteenuste pakkumisest tulenevale elektripaigaldise lisandväärtuse tõstmisele on oluline ka paigaldise kulude minimeerimine. Eesti ülekandevõrgu operaatori Elering AS-i sätestatud paindliku liitumise tingimused võimaldavad optimeerida investeringukulusid. Uus liituja ei pea tasuma elektrivõrgu tugevdamise tasusid, kuid ülekandevõrgu operaatorile jäetakse võimalus vajaduse korral piirata elektripaigaldise tarbimis- või tootmissuunalisi võimsusi. Paindlik liitumine eeldab liitumispunkti läbivate võimsusvoogude reguleerimist. Lisaks saab seda kasutada elektripaigaldise käidukulude minimeerimiseks. Üheks optimeerimisvõimaluseks on elektripaigaldise ja ülekandevõrgu vahelise reaktiivvõimsuse ülekande vähendamine ehk paigaldise reaktiivkoormuse katmine kohapealsete seadmetega. Teiseks võib kaaluda saartalitluse võime lisamist ehk elektripaigaldise varustuskindluse tõstmist. Sellega vähendatakse katkestustest põhjustatud tasusid kohapealsetele tarbijatele.

Magistritöö eesmärgiks on ühe Eesti tööstusettevõtte elektrivõrgu alusel välja töötada juhtalgoritmid süsteemiteenuste pakkumiseks, liitumispunkti läbivate võimsusvoogude reguleerimiseks ja saartalitluse võime tagamiseks. Tööstusettevõtte elektrivõrgus praegu kasutusel olevate tootmisüksuste vanusest ja ettevõtte plaanidest lähtuvalt vaadeldakse erinevate tootmisüksuste koostööd, milleks võivad olla sünkroongeneraatorid, tuuleelektrijaamad, päikeseelektrijaamad ja akupangad. Uuritakse erinevaid meetodeid aktiiv- ja reaktiivvõimsuste jaotamiseks tootmiseseadmete vahel ning arutletakse meetodite eeliste ja puuduste üle. Lõputöös keskendutakse tehniliste lahenduste välja töötamisele, mis võimaldavad vähendada

tööstusettevõtte elektrivõrgu investeringu- ja käidukulused ning tõsta võrgu lisandväärtust süsteemiteenuste pakkumisega.

Tööstusettevõtte elektrivõrk modelleeritakse lõputööks antud lähteandmete põhjal elektrisüsteemi reaajasimulaatoril RTDS (*Real-Time Digital Simulator*). Olemasolevasse elektrivõrku lisatakse perspektiivsed tootmisüksused: päikeseelektrijaam, tuuleelektrijaam ja akupank. Juhtalgoritmide arendamine teostatakse kahes etapis. Esmalt töötatakse välja juhtalgoritmide kontseptsioon reaajasimulaatoril ning kontrollitakse aktiiv- ja reaktiivvõimsuste jaotamiseks koostatud algoritmide paikapidavust. Lisaks testitakse juhtalgoritmide võimet juhtida tootmisüksusi ettenähtud eesmärkide täitmisel.

Reaajasimulaatori kasutamine võimaldab luua reaalse elektrivõrguga sarnase keskkonna, kuid sellel koostatud juhtalgoritmide rakendamine ei võta arvesse kontrolleri kasutamisel tekkivaid tark- ja riistvaralisi piiranguid. Reaajasimulaatoril välja töötatud lahendused viiakse üle National Instrumentsi tööstuskontrollerile CompactRIO. Juhtalgoritme täiendatakse nii, et kontrollerit on arendustegevuse lõpuks võimalik kasutada reaalses elektripaigaldises liitumispunkti läbivate võimsusvoogude reguleerimiseks, süsteemiteenuste pakkumiseks ja saartalitluse juhtimiseks.

Lõputöö esimeses peatükis kirjeldatakse elektrisüsteemi süsteemiteenuseid. Esmalt selgitatakse süsteemiteenuste üldpõhimõtteid. Seejärel keskendutakse sagedusega seotud süsteemiteenustele, pingega seotud süsteemiteenustele ja muudele süsteemiteenustele. Iga süsteemiteenuse juures tuuakse näited tootmiseseadmetest või muudest elektrisüsteemiga ühendatud seadmetest, millega on võimalik vaadeldavat süsteemiteenust pakkuda.

Lõputöö teises osas esitatakse ülevaade elektrienergia tootmistehnoloogiatest, mida tööstusettevõtte elektrivõrgus kasutatakse, näiteks sünkroongeneraator, või mis oleksid perspektiivsed, näiteks elektrituulik, päikesepaneel, akupank. Kirjeldatakse pingemuunduritel põhinevaid sagedusmuundureid, mida kasutavad elektrituulik, päikesepaneel ja akupank.

Järgnevalt käsitletakse reaajasimulaatorit RTDS ja modelleerimistarkvara RSCAD. Kirjeldatakse tööstusettevõtte elektrivõrgu ülesehitust ja parameetreid ning tootmiseseadmete mudelid reaajasimulaatoris. Koostatakse tootmisüksuste vahel aktiiv- ja reaktiivvõimsuste võrdelise, järjestikulise ja proportsionaalse jaotamise matemaatilised kriteeriumid ning arutletakse nende eeliste ja puuduste üle erinevate

eesmärkide täitmisel. Selgitatakse koostatud juhtalgoritmide toimimise põhimõtteid ja ülesehitust reaajasimulaatoril.

Neljandas peatükis esitatakse ülevaade kasutatud tööstuskontrollerist. Määratakse reaajasimulaatori ja kontrolleri vahel edastavad andmed ning koostatakse katsestend. Reaajasimulaatoril välja töötatud juhtalgoritme kohandatakse, et neid oleks võimalik tööstuskontrolleriga rakendada. Lisatakse funktsioonid IEC 61850 GOOSE sõnumite vastuvõtmiseks ja analoogpingete väljastamiseks.

Viiendas osas testitakse tööstuskontrolleri juhtalgoritmide tööd erinevate juhtimiseesmärkide täitmisel. Uuritakse liitumispunkti läbiva aktiiv- ja reaktiivvõimsuse reguleerimist, saartalitluse juhtimist ning sageduse ja pingega seotud süsteemiteenuste pakkumist. Esitatakse katsete tulemused ja selgitatakse neid. Lisaks võrreldakse tööstuskontrolleri ja reaajasimulaatori juhtalgoritmide toimeid kiirete ja aeglase protsesside korral. Uuritakse juhtalgoritmide rakendamise majanduslikku mõju.

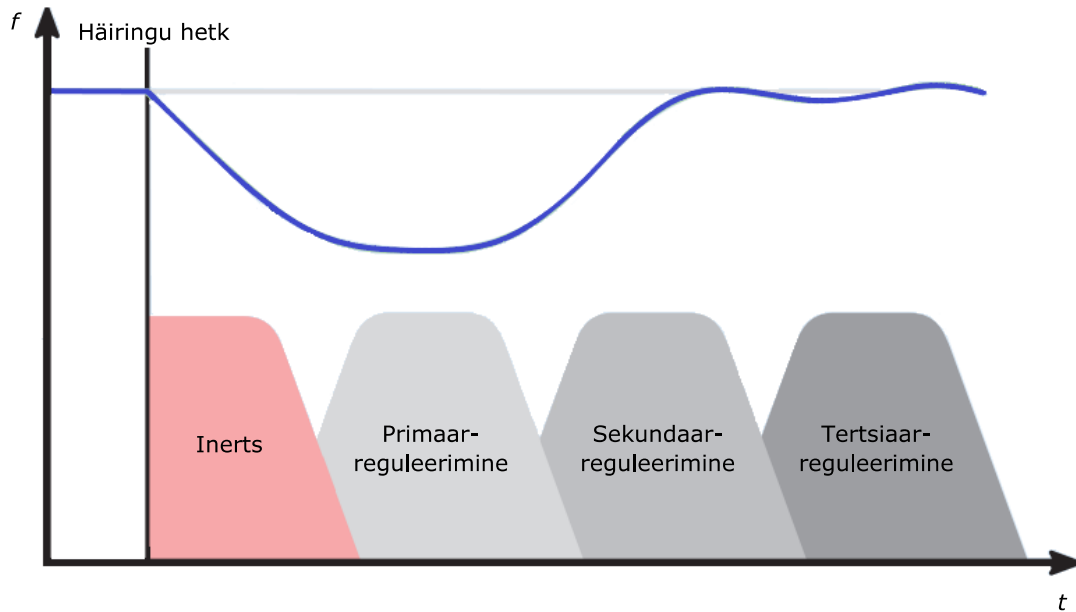
Lõputöö tulemuseks on tööstuskontrolleri juhtalgoritmid, mis võimaldavad süsteemiteenuste pakkumist, liitumispunkti läbivate võimsusvoogude reguleerimist ning saartalitluse juhtimist. Välja töötatud juhtalgoritme võib rakendada ka teiste sarnaste elektripaigaldiste juhtimiseks.

1. ELEKTRISÜSTEEMI SÜSTEEMITEENUSED

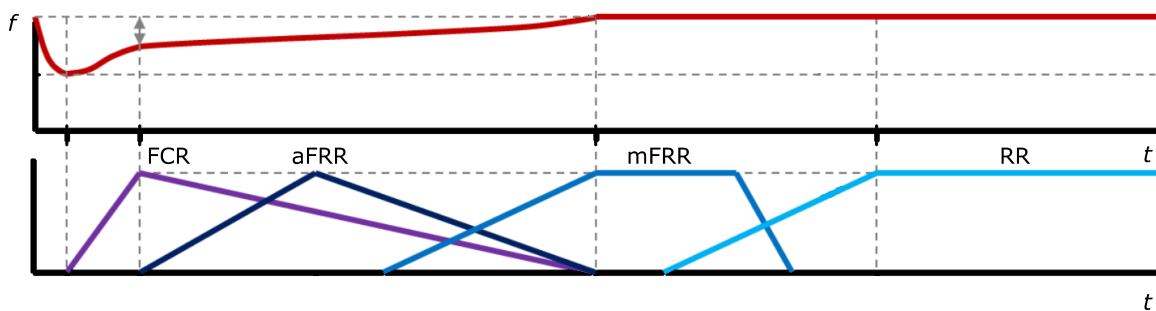
Süsteemiteenuseid on võimalik defineerida mitmel viisil tulenevalt elektrisüsteemide ülesehitusest, võimekustest ja seadustes sätestatud nõuetest. ENTSO-E [3] on defineerinud süsteemiteenused kui funktsioonid, mis on ülekandevõrgu operaatorile kättesaadavad elektrisüsteemi turvalisuse tagamiseks. Need funktsioonid hõlmavad pimekäivitus-võimekust ehk võimalust süsteem peale selle kustumist taaspingestada, sageduse reageeringut ehk sageduse hoidmist automaatse ja kiire reguleerimisega, kiireid reserve ehk reserve, mis võimaldavad vajadusel süsteemi võimsust lisada, reaktiivvõimsuse pakkumist ja muid teenuseid. Eesti ülekandevõrgu operaatori Elering AS-i [4] süsteemiteenuste definitsioon on sarnane. Selle kohaselt on süsteemiteenused tehnilised meetmed, millega tagatakse elektrisüsteemi töö- ja varustuskindlus ning elektrienergia ülekande kvaliteet. Erinevate süsteemiteenuste kasutamise vajaduse tingib elektrisüsteemi iseloom. Selle all mõeldakse näiteks elektrisüsteemi tugevust, ühendusi teiste süsteemidega ja läbi sagedusmuundurite süsteemiühendatud tootmisüksuste osakaalu. Käesolevas peatükis käsitletakse süsteemiteenuseid kolmes osas: sageduse ehk aktiivvõimsusega seotud teenused, pinge ehk reaktiivvõimsusega seotud teenused ja muud teenused.

1.1 Sagedusega seotud süsteemiteenused

Elektrisüsteemi sagedus on seotud aktiivvõimsuse tootmise ja tarbimise tasakaaluga. Eeldades, et tarbimine on konstantne tõuseb sagedus tootmise suurenemisel ning langeb tootmise vähenemisel. Eeldades, et tootmine on konstantne tõuseb sagedus tarbimise vähenemisel ning langeb tarbimise suurenemisel. Püsitalitlusel on eesmärgiks hoida elektrisüsteemi sagedus nimiväärtuse (Eestis 50 Hz) juures. Traditsiooniliselt on selleks kasutatud suurte soojuselektrijaamade turbiinide primaar-, sekundaar- ja tertsaarreguleerimist, kuid seoses tuule- ja päikeseelektrijaamade ning akupankade osakaalu suurenemisega muutub oluliseks sageduse reguleerimine süsteemiteenusena. Joonisel 1.1 on esitatud sageduse primaar-, sekundaar- ja tertsaarreguleerimise põhimõtte ning joonisel 1.2 ülevaade sageduse reguleerimise süsteemiteenustest.



Joonis 1.1 Sageduse primaar-, sekundaar- ja tertsiaarreguleerimine [5]



Joonis 1.2 Sageduse reguleerimine süsteemiteenusena [6]

Joonistelt 1.1 ja 1.2 on näha, et sageduse primaar-, sekundaar- ja tertsiaarreguleerimise süsteemiteenuste vasted on sageduse hoidmise reservid (FCR - *Frequency Containment Reserves*), sageduse taastamise reservid (aFRR ja mFRR - *Frequency Restoration Reserves*) ja asendusreservid (RR - *Replacement Reserves*). Lisaks on näha, et joonisel 1.2 puudub otsene vaste inertsile, kuid ka selleks on loodud erinevad süsteemiteenused, näiteks kiire sageduse reageering (FFR - *Fast Frequency Response*) [7]. Sageduse primaar-, sekundaar- ja tertsiaarreguleerimist on kirjeldatud allikates [8] ja [9] ning sageduse reguleerimise süsteemiteenuseid allikates [6], [7] ja [10].

Sageduse primaarreguleerimine on esimene reguleerimismehhanism sageduse kõrvalekalde korral nimiväärtusest. Tulenevalt sellest, et sagedus on üle sünkroonala sama, osalevad primaarreguleerimises kõik kiirusregulaatoritega varustatud seadmed. Reguleerimiseks kasutatakse statismi, mis väljendab seadme väljundvõimsuse muutust sõltuvalt sageduse muutusest. Näiteks tähendab 5% statism, et sageduse langemisel

5% võrra suureneb seadme väljundvõimsus nullist nimiväärtuseni. Lisaks osalevad primaarreguleerimises sagedustundlikud koormused, näiteks asünkroonmootorid, mille võimsus sageduse langemisel väheneb, mis aitab samuti piirata sageduse muutust. Sageduse primaarreguleerimise eesmärgiks on piirata sageduse langus teatud tasemega. Süsteemiteenusena täidavad primaarreguleerimisega sama eesmärgi sageduse hoidmise reservid.

Balti riikide sagedus-koormus juhtimise kontseptsioonilahenduse [6] kohaselt on sageduse hoidmise reservide tundetussoon 10 mHz, mille jooksul reguleerimist ei teostata. Sageduse kõrvalekalletel üle 200 mHz, peavad 50% reservidest olema käivitatud 15 sekundi jooksul ja kõik reservid 30 sekundi jooksul. Lisaks peab reguleerimine toimuma lineaarselt. See tähendab, et näiteks sageduse kõrvalekaldel 100 mHz, peab käivitama 50% kõikidest reservidest eelnevalt kirjeldatud aja jooksul ehk 25% kõikidest reservidest 15 sekundi jooksul ja 50% kõikidest reservidest 30 sekundi jooksul. Sageduse hoidmise reservide minimaalne tööperiood sageduse kõrvalekalletel kuni 1 Hz ei ole piiratud. Suurematel kõrvalekalletel on minimaalseks tööperioodiks 30 minutit. Erinevuseks on reservid, mis töötavad salvestatud energiaga, näiteks akupangad ja pump-hüdro elektrijaamad. Sellisel juhul on reservi minimaalne ja maksimaalne tööperiood vastavalt 15 ja 30 minutit.

Sageduse primaarreguleerimise eesmärgiks on piirata sageduse muutus teatud tasemega, kuid mitte viia seda tagasi nimiväärtusele. Selleks kasutatakse sageduse sekundaarreguleerimist. Sekundaarreguleerimist teostatakse sageduse langemisel täiendavate tootmisvõimsuste lisamisega või koormuse vähendamisega ja sageduse tõusmisel tootmisvõimsuste vähendamisega või koormuse lisamisega. Lisaks vabastatakse sekundaar-reguleerimisega primaarreguleerimiseks kasutatud võimsusi, kuid sekundaar-reguleerimises võivad osaleda ka tootmisüksused, mis eelnevalt osalesid primaar-reguleerimises. Süsteemiteenusena täidavad kirjeldatud eesmärgi sageduse taastamise reservid.

Sageduse taastamise reservid võib jagada kaheks: automaatselt (aFRR) ja manuaalselt (mFRR) käivitatavad reservid. Automaatsete reservidena kasutatakse juba töös olevaid tootmisüksusi ehk kuumreserve, mis käivitatakse SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) signaalide alusel ja need peavad saavutama täisvõimsuse maksimaalselt 5 minuti jooksul. Manuaalsete reservidena kasutatakse nii kuum- kui ka külmreserve, mis käivitatakse süsteemioperaatori käsuga ja peavad saavutama täisvõimsuse maksimaalselt 12,5 minuti jooksul. Manuaalsete reservide eesmärgiks on peale sageduse taastamise ka automaatsete reservide vabastamine. Lisaks on allika [6] alusel

manuaalsete reservide minimaalne maht 1 MW ja pakkumine toimub 1 MW astmetega. Automaatsed reservid käivitatakse täpsusega 0,01 MW ning manuaalsed reservid täpsusega 1 MW.

Sageduse sekundaarreguleerimise eesmärgiks on viia sagedus peale häiringut tagasi nimiväärtusele. Tertsiaarreguleerimise eesmärgiks on eeskätt vabastada sekundaarreguleerimises osalenud võimsusi ja teisalt reguleerida ühendsüsteemi elektrilist aega. Elektrilise aja all mõeldakse sageduse keskmist väärtust teatud ajaperioodis. Näiteks kui peale sageduse häiringut taastati sageduse nimiväärtus, kuid sageduse keskmine väärtus on alla nimiväärtuse, siis talitletakse mõnda aega seisundis, kus sagedus on nimiväärtusest kõrgem. Süsteemiteenusena täidavad kirjeldatud eesmärgi asendusreservid. Lisaks on asendusreservide kasutamise eesmärgiks riikidevaheliste vahetusvõimsuste viimine lubatud piiridesse ja koormuse optimaalne jaotus tootmisüksuste vahel. Asendusreservide käivitamine toimub manuaalselt.

Kiire sageduse reageering on seotud elektrisüsteemi inertsi, mis on keha võime vastu panna muutustele selle liikumises. Elektrisüsteemides väljub inertsi süsteemiga otseühenduses olevas pöörlevas massis. Otseühenduse all mõeldakse seda, et vaadeldava seadme mehaaniline ja elektrisüsteemi elektriline osa on sidus ühenduses. Inerts tähendab, et sageduse languse korral on sünkroongeneraatorid enda pöörlevasse massi salvestunud kineetilise energia arvelt võimelised süsteemi kiiresti võimsust lisama. Sellest tulenevalt vähendab suurem inertsi sageduse muutumise kiirust, mis võimaldab omakorda töötada sageduse primaarreguleerimisel. Samas toob taastuvenergiaallikate kasutamine kaasa elektrisüsteemi inertsi vähenemise. Põhjus seisneb siin selles, et tuule- ja päikeseelektrijaamad on süsteemi ühendatud läbi jõuelektronika ehk sageduse muutuse korral ei toimu loomulikku energia vahetust süsteemi ja tootmisüksuse vahel. Näiteks kasutasid kõik Eestis aastatel 2007...2017 ehitatud uued tuuleelektrijaamad täismuunduritel põhinevat lahendust [11]. Seetõttu muutub süsteemiteenusena oluliseks kiire sageduse reageering [5], [12].

Kiiret sageduse reageeringut on võimalik teostada aktiivvõimsuse kiire sisestamisega elektrisüsteemi või koormuse kiire vähendamisega. Eesmärgiks on inertsi sarnaselt vähendada sageduse muutumise kiirust ja võimaldada sageduse hoidmise reservide tööd. Kiiret sageduse reageeringut kasutatakse näiteks Iirimaal [13] ja Soomes [14]. Allikas [15] kirjeldati kiire sageduse reageeringu võimalikku lahendust Texas. Iirimaal nõutakse aktiivvõimsuse tõstmist kahe sekundi jooksul peale sageduse kõrvalekalde tekkimist ja seda peab hoidma vähemalt kaheksa sekundit. Soomes sõltub maksimaalne käivitusaeg sageduse kõrvalekalde suuruselt. Teenuse pakkuja saab seejuures valida,

millise sageduse väärtuse korral ta oma reservid käivitab. Sagedusel 49,7 Hz on nõutav käivitusaeg kuni 1,3 sekundit, sagedusel 49,6 Hz kuni 1,0 sekundit ja sagedusel 49,5 Hz kuni 0,7 sekundit. Minimaalne tööperiood on alati viis sekundit ja reguleerimise lõpetamise kiirus kuni 20% reguleerimismahust sekundis. Texases nõutakse kiire sageduse reageeringu korral täisvõimsuse saavutamist 0,5 sekundiga ja seda peab säilitama vähemalt 10 minutit.

Elektrisüsteemi ühendatud seadmeid, millega on võimalik pakkuda sagedusega seotud süsteemiteenuseid, on käsitletud allikas [7]. Sünkroongeneraatorite, sünkroonaladevaheliste kõrgepinge alalisvooluühenduste, Eestis Estlink 1 ja Estlink 2 ning salvestusseadmetega on võimalik pakkuda kõiki eelnevalt käsitletud süsteemiteenuseid. Sagedustundlikud koormused, näiteks asünkroonmootorid osalevad primaarreguleerimises kuna sageduse langedes nende võimsus väheneb ja vastupidi, kuid süsteemiteenuste kontekstis neid tihti ei vaadelda. Samas võivad alasagedusreleedega varustatud koormused osaleda kiires sageduse reageeringus. Tuule- ja päikeseelektrijaamadega on põhimõtteliselt võimalik samuti pakkuda kõiki eelnevaid süsteemiteenuseid, kuid see eeldab nende juhtimissüsteemide täiendamist. Lisaks tähendab nende kasutamine, et osa võimalikust toodetavast energiast jääb tootmata. Lisaks ei pruugi need alati olla saadaval ka tootmise vähendamiseks. Samuti tuleb nende kasutamisel arvestada ilmastikutingimuste muutlikkusega, mis eeldab täpseid prognoosimudeleid.

1.2 Pingega seotud süsteemiteenused

Erinevalt sagedusest, mis on ühendsüsteemi üleselt sama, on pingele elektrisüsteemis lokaalsema iseloomuga ja sõltub aktiivvõimsuse asemel reaktiivvõimsuse tootmise ja tarbimise tasakaalust vaadeldavas sõlmes. Lisaks ei ole elektrisüsteemi induktiivsetes elementides, näiteks liinides ja trafodes, tekkivate kadude tõttu reaktiivvõimsuse ülekande süsteemis majanduslikult mõttekas. Samuti tähendaks see, et pingetootmisüksuse lattidel võib ületada lubatud piire. Sellest tulenevalt on mõistlik pinget reguleerida lokaalselt. Sarnaselt sageduse reguleerimisega jaotatakse ka pinget reguleerimine primaar-, sekundaar- ja tertsaarreguleerimiseks, mida on käsitletud allikates [8] ja [10].

Pinget primaarreguleerimine toimub automaatselt ja sarnaselt sageduse primaarreguleerimisega kasutatakse selleks statismi. Reguleerivateks seadmeteks võivad olla

pingeregulaatoritega varustatud generaatorid, sünkroonkompensaatorid, staatilised reaktiivvõimsuse kompensaatorid, mehaaniliselt lülitatavad kondensaatorpatareid ja reaktorid ning trafode automaatsed astmelülitid. Primaarreguleerimise eesmärgiks on pinge hoidmine sätteväärtuse juures. Pinge sekundaarreguleerimise eesmärgiks on pinge kvaliteedi, elektrisüsteemi töökindluse ja talitluse paindlikkuse tõstmine. Pinget reguleeritakse ette määratud kontrollsõlmedes, mis mõjutavad terve piirkonna pinge taset. Pinge tertsaarreguleerimine toimub elektrisüsteemi üleselt ning selle reageerimiskiirus ja toimeaeg peavad olema pikemad kui sekundaarreguleerimisel, et võimaldada eelnevaid reguleerimisi. Eesmärgiks on saavutada süsteemi optimaalne talitus kadude minimeerimise, pinge hoidmise ja reservvõimsuste taastamisega. Tänapäeval ei tehta tavaliselt vahet pinge primaar-, sekundaar- ja tertsaarreguleerimisel ning reguleerimine toimub ühtse mehhanismina [10]. Süsteemiteenusena võib pinge reguleerimise jaotada normaaltalitluse reguleerimiseks ja kiireks reaktiivvoolu sisestuseks [7].

Normaaltalitlusel on pinge reguleerimise süsteemiteenus eesmärgiks pingetaseme hoidmine kontrollsõlmedes. Seda teostatakse võimsusteguri, reaktiivvõimsuse või pinge otsese reguleerimisega vaadeldavas elektrisüsteemi sõlmes. Tehniliselt tähendavad kõik mainitud kolm reguleerimisviisi reaktiivvõimsuse tootmise või tarbimise muutmist reguleeritavas sõlmes. Kiire reaktiivvoolu sisestamise eesmärgiks on tagada elektrisüsteemi pingestabiilsus, et vältida pinge kollapsi või seda piirata.

Elektrisüsteemi ühendatud seadmeid, millega on võimalik pakkuda pingega seotud süsteemiteenusid, on käsitletud allikates [7] ja [12]. Nendeks seadmeteks on sünkroongeneraatorid, salvestusseadmed, staatilised kompenseerimisseadmed, kondensaatorpatareid, reaktorid, pingemuunduritega alalisvooluülekanded, näiteks Estlink 1, tüüp 3 ja 4 tuuleelektrijaamad ning päikeseelektrijaamad. Elektrisüsteemi läbi jõuelektroonika ühendatud seadmete puhul tuleb arvestada jõuelektroonikaseadmete niminäivvõimsusega. Näiteks, kui sagedusmuunduri nimivõimsus on võrdne tuuleelektrijaama niminäivvõimsusega, ei ole maksimaalse aktiivvõimsuse korral enam võimalik reaktiivvõimsust toota. Tavapäraselt on pinge reguleerimine elektrisüsteemides kohustuslik ja ei ole seetõttu tasustatud, kuid läbi jõuelektroonika süsteemi ühendatud tootmisüksuste puhul võiks seda vaadelda kui tasustatud süsteemiteenust, kuna see eeldab muundurite üledimensioneerimist, mis toob kaasa kõrgemad investeeringukulud. Samuti on nende efektiivsus juhul kui võimsustegur ei ole võrdne ühega madalam, mis suurendab kadusid ja käidukulusid.

1.3 Muud süsteemiteenused

Sageduse ja pingereguleerimisega seotud süsteemiteenused on kasutusel kõikides allikates [10], [16] ja [17] käsitletud riikides ning seega võib eeldada, et need on süsteemiteenustest kõige olulisemad. Samas on igas riigis kasutusel ka muud teenused, mis ei ole otseselt seotud sageduse ja pingereguleerimisega. Selliseid süsteemiteenuseid on käsitletud allikates [7], [12]. Järgnevalt tuuakse näidetena välja elektrisüsteemi stabiilsuse, elektrikvaliteedi ning võimsusvoogude ja koormuste juhtimise süsteemiteenused.

Elektrisüsteemi stabiilsuse süsteemiteenuse all mõistetakse võimsuste võnkumiste summutamist, eelkõige generaatorite rootorite võnkumiste summutamist. Teenuse eesmärgiks on tagada elektrisüsteemi staatiline ja dünaamiline stabiilsus. Põhiliselt kasutatakse selleks sünkroongeneraatorite võnkesummuteid (PSS – *Power System Stabilizer*), pingemuunduritega alalisvooluühendusi ja staatilisi reaktiivvõimsuse allikaid. Tulevikus on võimalik selleks eesmärgiks kasutada ka ülekandevõrguga seotud piisavalt võimsaid tuuleelektrijaamasid [7].

Elektrikvaliteedi süsteemiteenuse näiteks võib tuua harmoonikute summutamise. Teenuse põhimõtteks on kindlat järku harmooniku sisestamine elektrisüsteemi sõlme, mis vastandub sõlmes esinevale harmoonikule ja seega vähendab harmoonmoonutustegurit (THD – *Total Harmonic Distortion*). Teenust on võimalik pakkuda näiteks süsteemi läbi jõuelektroonika ühendatud tootmisüksustega, mille tööd reguleerides on neid võimalik kasutada kui aktiivfiltreid. Põhiliseks piiriks on siin tingimus, et süsteemi sisestatud voolu efektiivväärtus ei ületaks muunduri nimivoolu. Seega on selliseid tootmisüksusi võimalik filtritena kasutada juhul kui nende põhisageduslik koormusvool on alla nimivoolu. Samas arvestades, et vooluharmoonikud on reaktiivvoolud, siis on võimalik neid tootmisüksusi filtritena kasutada ka juhul kui primaarne energiaallikas ei ole kätte saadav. Lisaks ei ole harmoonikute summutamiseks tarvis lisaseadmeid, kuid harmoonikute filtreerimine tekitab sarnaselt reaktiivvõimsuse tootmisega lisakadusid.

Võimsusvoogude ja koormuse juhtimine on eeskätt elektrisüsteemi planeerimisega seotud probleem. Süsteemiteenusena kuuluvad siia tipukoormuse optimeerimine või energia vahendamine ja koormuse juhtimine. Võimsusvoogude reguleerimiseks on võimalik kasutada näiteks faasinihutitega trafosid, koormuse all lülitatavaid trafode astmelüliteid ja lülitatavaid kondensaatortarvaid. Tipukoormuse vähendamiseks saab kasutada akupankasid. Koormuse juhtimist võib vaadelda eraldi tööstus- ja kommertstarbijate ning kodumajapidamiste juhtimisena, mida on pikemalt käsitletud

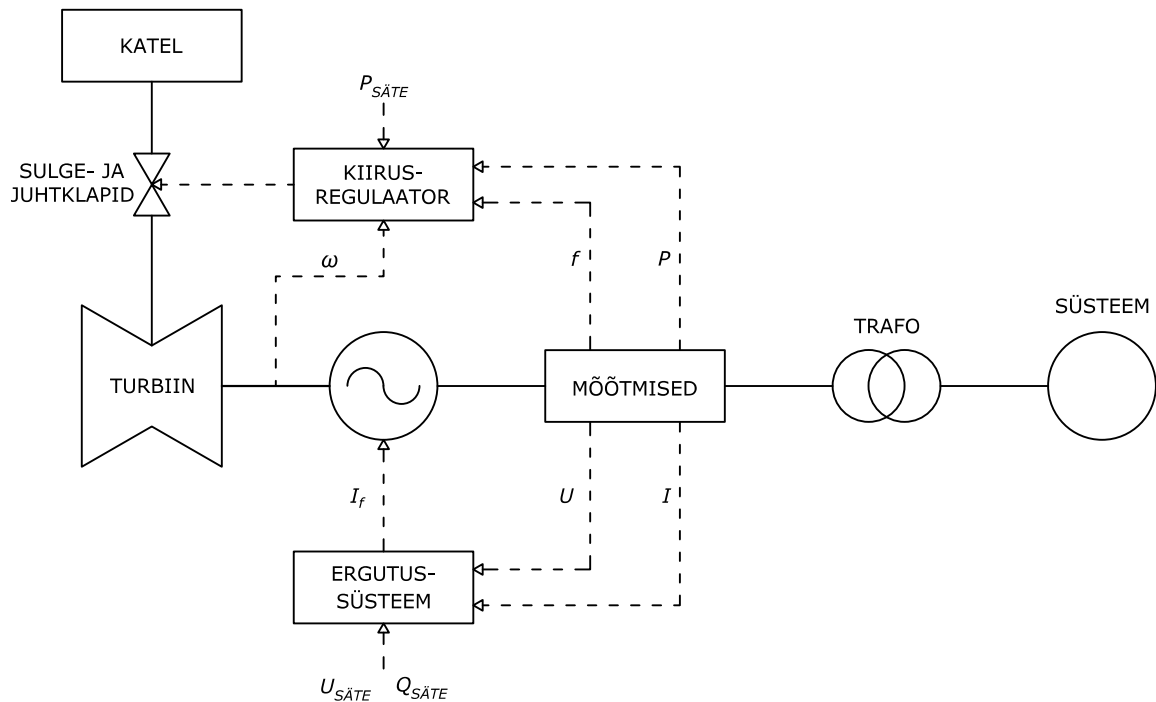
allikas [18]. Tööstustarbijate puhul on oluline näiteks vaheladu ehk salvesti ja selle maht. Juhul kui vahelaos on järgneva protsessi jaoks piisavalt materjali, on võimalik vahelaole eelnev protsess tipukoormuse vähendamiseks peatada ja hiljem uuesti käivitada. Kommertshoonetes on võimalik reguleerida näiteks kütteseadmete ja valgustuse tööd [7]. Võimsusvoogude juhtimise näiteks Eestis võib tuua Elering AS-i sätestatud paindliku liitumise tingimused [19], mille kohaselt võib ülekandevõrgu operaator vajadusel piirata ülekandevõrguga liitunud elektripaigaldise tootmis- või tarbimissuunalisi võimsusi. Tegu ei ole otseselt süsteemiteenusega ja on tasustamata, kuid see võimaldab vähendada liitumiskulusid, kuna liituja ei pea tasuma võrgu tugevdamise eest.

2. ELEKTRIENERGIA TOOTMISTEHNOLOOGIAD

Käesolevas peatükis keskendutakse erinevatele tootmistehnoloogiatele nagu sünkroongeneraatorid, elektrituulikud, päikesepaneelid ja akupangad. Sünkroongeneraatorit vaadeldakse tulenevalt lõputöö aluseks olevast elektrivõrgust, kuhu on ühendatud sünkroongeneraatoriga koostootmisjaam. Elektrituulikud ja päikesepaneelid pakuvad huvi seoses praeguse energiapoliitikaga, mida Eestis kirjeldavad Eesti riiklik energia- ja kliimakava aastani 2030 (REKK 2030) [1] ja energiamajanduse arengukava aastani 2030 (ENMAK 2030) [2]. REKK 2030 kohaselt on eesmärgiks, et taastuvenergiaallikatest toodetud elektrienergia osakaal moodustab 2030. aastal lõpptarbimisest 40% ning ENMAK 2030 kohaselt vähemalt 30%. Akupangad pakuvad huvi seoses tuule- ja päikeseelektrijaamade osakaalu suurenemisega ja nende elektrienergia toodangu muutlikkusega, mida on võimalik akupankadega ühtlustada.

2.1 Sünkroongeneraatorid

Traditsiooniliselt toodetakse elektrienergiat suurtes soojus- või hüdroelektrijaamades sünkroongeneraatoritega, mille tööpõhimõtteid on kirjeldatud allikates [8], [9], [20] ja [21]. Vaadeldava elektrivõrgu koostootmisjaam erineb soojuselektrijaamadest selle poolest, et koostootmisjaama peamiseks eesmärgiks on soojusenergia tootmine ning elektrienergia tootmine sõltub soojusenergia toodangust. Samas on koostootmisjaama tööpõhimõtte sarnane soojuselektrijaamaga: katlas kasutatakse kütuse põletamisel saadud soojust vee aurustamiseks ja ülekuumendamiseks. Ülekuumendatud aur juhitakse läbi sulge- ja juhtklappide auruturbiinile ehk primaarsele jõuallikale, mille eesmärgiks on auru kineetilise energia muundamine pöörlevaks mehaaniliseks energiaks. Primaarne jõuallikas ei pea seejuures olema auruturbiin, vaid sõltub elektrijaama tüübist. Näiteks on hüdroelektrijaamades selleks hüdroturbiin, gaasielektrijaamades gaasiturbiin jne. Turbiin on võlliga jäigalt seotud sünkroongeneraatori rootoriga, mis tekitab pöörleva magnetvälja. Pöörlev magnetväli tekitab voolu generaatori staatori mähistes, mis voolab edasi trafosse, kus muundatakse pinge elektrisüsteemiga samale tasemele. Elektrijaama lihtsustatud põhimõtteskeem koostati allikate [8] ja [9] alusel ja on esitatud joonisel 2.1. Koostatud joonisel ei ole näidatud soojusenergia liikumise teekonda, sest see ei ole elektrienergia tootmisprotsessi seisukohalt, millele lõputöös keskendutakse, oluline.



Joonis 2.1 Elektriijaama põhimõtteskeem. Pidevjoontega on tähistatud auru liikumise teekond, turbiini ja generaatorit ühendav võll ning generaatori väljundvoolu teekond. Kriipsjoontega on tähistatud mõõteväärtused ja juhtsignaalid [8], [9]

Generaatori väljundvõimsuse ja pinge reguleerimiseks on olulised turbiini kiirusregulaator ja generaatori ergutussüsteem. Turbiini kiirusregulaatori sisenditeks on turbiini ja seega ka generaatori rootori nurkkiirus ω , generaatori väljundist mõõdetud aktiivvõimsus P ja sagedus f ning aktiivvõimsuse sätteväärtus $P_{SÄTE}$. Kiirusregulaatori väljunditeks on juhtsignaalid turbiini auru sulge- ja juhtklappidele. Turbiinid on tavaliselt mitmeastmelised koosnedes kõrg-, kesk- ja madalrõhu astmetest. Katlast väljuv ülekuumendatud aur siseneb esimesena kõrgrõhuastmesse, kus auru temperatuur ja rõhk langevad. Seejärel läbib aur vaheülekuumendit ja juhitakse edasi turbiini kesk- ja madalrõhu astmetesse. Kõrg- ja keskrõhuastmete ees on lisaks ka eraldi sulge- ja juhtklapid. Generaatori väljundist mõõdetud aktiivvõimsuse ja sageduse ning aktiivvõimsuse sätteväärtuse alusel reguleeritakse normaaltalitusel turbiini antavat auru kogust ehk reguleeritakse auru juhtklappe. Turbiini nurkkiiruse alusel rakendatakse turbiini ülekiiruse juhtimist ja liigkiiruskaitset. Ülekiiruse juhtimise vajalikkus tekib elektrilise koormuse järsul vähenemisel ja sellisel juhul reguleeritakse nii juhtklappe kui ka turbiini kesk- ja madalrõhuastmete ees olevat sulgeklappi. Liigkiiruskaitsega juhitakse turbiini kõrgrõhuastme ees olevat sulgeklappi, mille eesmärgiks on kogu katlast väljuva auru juhtimine turbiinist mööda olukorras, kus ülekiiruse juhtimine ei ole suutnud turbiini kiirust piisavalt vähendada. Selle kaitse rakendamise korral edastatakse ka käsk generaatori välja lülitamiseks.

Sünkroongeneraator koosneb kahest peamisest osast, paigal seisvast osast ehk staatorist ja pöörlevast osast ehk rootorist. Kolme faasilises süsteemis on generaatoril kolm staatori mähist ehk üks mähis iga faasi kohta. Rootori pooluspaaride arv võib erineda ning sellest tuleneb rootori pöörlemiskiirus, mida kirjeldab avaldis 2.1.

$$n = \frac{60f}{p} \quad (2.1)$$

kus n – rootori pöörlemiskiirus, p/min;
 f – elektrisüsteemi põhisagedus, Hz;
 p – rootori pooluspaaride arv.

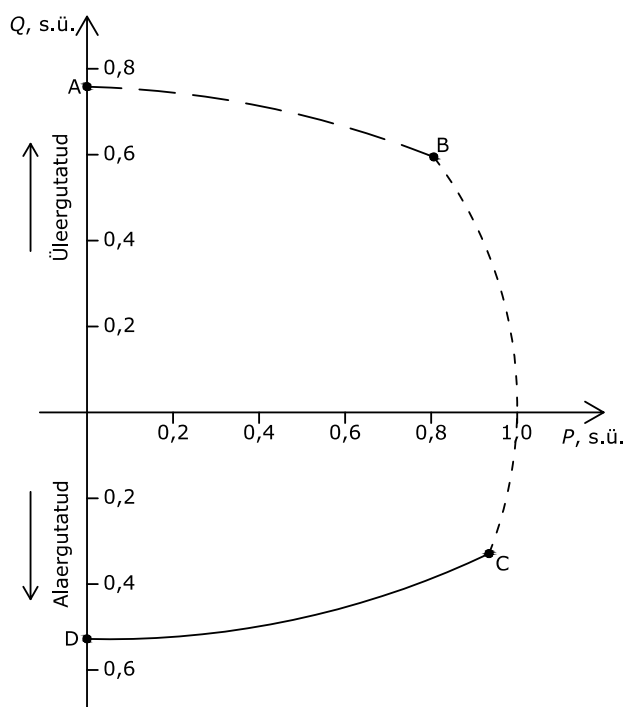
Avaldisest 2.1 tulenevalt on 50 Hz põhisagedusega elektrisüsteemis ühe pooluspaari korral rootori pöörlemiskiirus 3000 p/min, kahe pooluspaari korral 1500 p/min jne. Sünkroonmasina tööks on vajalik, et nii staatori kui ka rootori mähistes oleks vool, mis tekitab rootori mähise ehk ergutusmähise ümber magnetvälja. Eeldades esmalt, et tegu on sünkroonmootoriga, tekitab elektrisüsteemi vahelduvvool staatoris pöörleva magnetvälja ja igal ajahetkel tõmmatakse staatori positiivse pooluse külge rootori negatiivne poolus ja vastupidi. Juhul kui sünkroonmasina rootori külge on ühendatud primaarne jõuallikas, mis paneb rootori pöörlema kiiremini kui pöörleb staatori magnetväli hakkab masin tööle generaatorina ja rootor veab staatori mähiste magnetvälja edasi.

Rootoris magnetpooluste tekitamiseks on võimalik kasutada elektrilist ergutust või püsimagneteid. Täpsemalt vaadeldakse elektrilise ergutusega sünkroongeneraatorit. Ergutussüsteemi peamiseks eesmärgiks on toita ergutusmähiseid alalisvooluga ehk tekitada rootoris püsivad magnetpoolused. Lisaks võib ergutussüsteem sisaldada ka erinevaid juhtimis- ja kaitsefunktsioone, mis tagavad generaatori töö lubatud piirides ja elektrisüsteemi stabiilsuse. Nendeks funktsioonideks on näiteks automaatne pingeregulaator (*AVR – Automatic Voltage Regulator*), reaktiivvõimsuse regulaator, võnkesummuti ning üle- ja alaergutuspiirajad.

Võnkesummuti eesmärgiks on summutada generaatorite rootorite ehk aktiivvõimsuse võnkumisi elektrisüsteemis. Esiteks võivad need võnkumised viia elektrisüsteemi stabiilsuse kadumiseni ja teiseks vähendavad need agregaadid võlli eluiga. Võlli eluea vähenemine tuleneb sellest, et võllile mõjuvad kiiresti ja suurtes piirides muutuvad jõud. Kirjeldatud funktsiooni sisenditeks võivad olla turbiini pöörlemiskiirus, võrgusagedus ja aktiivvõimsus või nende kombinatsioon.

Automaatse pingeregulaatori eesmärgiks on hoida konstantset pinget generaatori klemmidel. Elektrisüsteemi pinge langemisel langeb pinge ka generaatori klemmidel ja seega suurendatakse generaatori ergutust, et tõsta generaatori reaktiivvõimsust. Reaktiivvõimsuse tõstmisega tõuseb generaatori klemmipinge ja elektrisüsteemi sõlme pinge. Automaatse pingeregulaatori tööga sarnaneb reaktiivvõimsuse regulaatori töö, kuid selle eesmärk on konstantse pinge hoidmise asemel, hoida konstantset sõlme läbivat reaktiivvõimsust. Samas pinge tõusmisel üle või langemisel alla lubatud piiri hakkab uuesti tööle automaatne pingeregulaator, mis peatab reaktiivvõimsuse edasise muutuse ja seega ka pinge tõusu või languse.

Eelneva täienduseks tuleb märkida, et üleergutatud seisundis toodab generaator elektrisüsteemi reaktiivvõimsust ja alaergutatud seisundis tarbib seda süsteemist. Reaktiivvõimsuse piiramiseks kasutakse peale automaatse pingeregulaatori ka üle- ja alaergutuspiirajaid. Nimetatud piirajate tööd kirjeldatakse generaatori näitliku PQ karakteristiku alusel, mis on esitatud joonisel 2.2.



Joonis 2.2 Sünkroongeneraatori näitlik PQ karakteristik [21]

Generaatori niminäivvõimsuseks on võimsus, mida generaator on määratud pinge ja võimsusteguri korral võimeline ülekuumenemata taluma. Generaatori aktiivvõimsust piirab primaarse jõuallika võimsus. Jooniselt 2.2 on näha, et generaatori reaktiivvõimsus on piiratud kolme kaarega, vastavalt kaar AB, kaar BC ja kaar CD. Staatori voolu ja staatori mähiste takistuste tõttu tekivad staatoris aktiivvõimsuskao, mis väljenduvad staatorimähiste ja selle ümbruse kuumenemisena. Seega on esimeseks generaatori

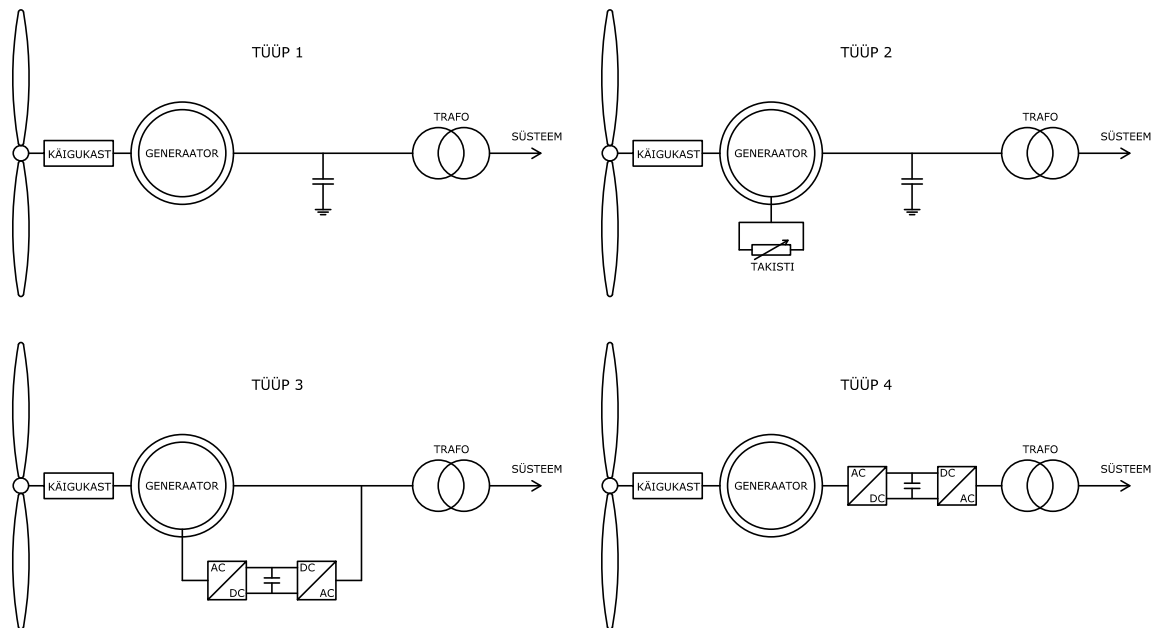
reaktiivvõimsust piiravaks teguriks staatori vool, millele vastab kaar BC. Joonisel 2.2 esitatud näite kohaselt on turbiini võimsus võrdne või suurem kui generaatori võimsus ehk kaar BC läbib x-telge punktis 1,0. Juhul kui turbiini võimsus on väiksem kui generaatori võimsus läbib kaar BC x-telge näiteks punktis 0,8.

Ergutusvoolu ja ergutusmähiste takistuse tõttu tekivad aktiivvõimsuskao rootoris, mis väljenduvad ergutusmähiste kuumenemisena. Seega on teiseks generaatori reaktiivvõimsust piiravaks teguriks ergutusvool, millele vastab kaar AB. Siinkohal peab rakenduma ergutussüsteemi üleergutuspiiraja. Samas on generaatoreid lubatud teatud aja jooksul ülekoormata ja seega toimib ka üleergutuspiiraja ette nähtud viitega, mille pikkus sõltub ergutusvoolu liigsusest.

Kolmandaks generaatori reaktiivvõimsust piiravaks teguriks on staatori laupühenduste kuumenemine, millele vastab kaar CD. Laupühenduste kuumenemine on seotud rootori otsas paikneva lukustusrõnga (*retaining ring*) küllastusega. Üleergutatud seisundis on lukustusrõngas küllastunud ja selle takistus laupühenduste puistevoogudele suur. Seega on puistevoogudest tingitud pöörivoolud staatoris väikesed ja kuumenemine piiratud. Alaergutuse korral on lukustusrõngas küllastumata ja selle takistus puistevoogudele väike. See toob kaasa pöörivoolude suurenemise staatoris ja staatori laupühenduste kuumenemise. Siinkohal peab rakenduma alaergutuspiiraja.

2.2 Elektrituulikud

Elektrituulikutega elektrienergia tootmine on põhimõttelt sarnane tavaliste soojuselektrijaamadega. Primaarseks jõuallikaks on auruturbiini asemel tuuleturbiin, millega muundatakse tuule kineetiline energia pöörlevaks mehaaniliseks energiaks. Turbiin võib generaatori rootoriga olla ühendatud läbi käigukasti või otse võlliga, esimesel juhul kasutatakse kõrge pöörlemiskiirusega ehk väikese pooluspaaride arvuga, generaatoreid ja teisel juhul madala pöörlemiskiirusega ehk suure pooluspaaride arvuga generaatoreid [22]. Elektrituulikud on võimalik jagada neljaks erinevaks tüübiks, vastavalt tüüp 1, tüüp 2, tüüp 3 ja tüüp 4, mille peamised erinevused tulenevad tuulikute elektrilisest osast ehk generaatorist, sagedusmuunduritest ja nende juhtsüsteemidest. Turbiini juhtimine on kõikidel tüüpidel sarnane ja tavaliselt kasutatakse selleks mehaanilisi pidureid ja turbiinilabade kaldenurga muutmist [23]. Erinevat tüüpi elektrituulikute tööpõhimõtteid on kirjeldatud allikates [23], [24], [25], [26] ja [27] ning nende põhimõtteskeemid on esitatud joonisel 2.3.



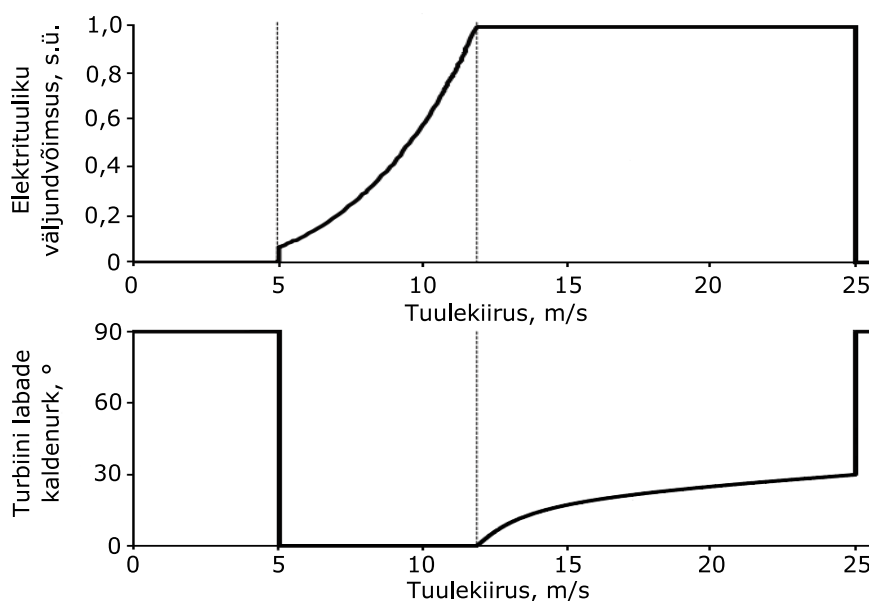
Joonis 2.3 Elekrituulikute tüüpide põhimõtteskeemid [24]

Tüüp 1 elekrituulikutes kasutatakse lühisrootoriga asünkroongeneraatoreid, mille staator on ühendatud otse elektrisüsteemiga. Seega sõltub tüüp 1 elekrituuliku väljundaktiivvõimsus otseselt tuulekiirusest. Aktiivvõimsuse reguleerimiseks kasutatakse tavaliselt turbiinilabade kaldenurga muutmist. Tulenevalt sellest, et asünkroongeneraatoritega ei ole võimalik reaktiivvõimsust reguleerida, tarbivad tüüp 1 tuulikud alati süsteemist reaktiivvõimsust, mille kompenseerimiseks kasutatakse kondensaatorpatareisid. Tavaliselt talitleb tüüp 1 elekrituulik sünkroonkiiruse lähedal, mis sõltub elektrisüsteemi sagedusest ja rootori pooluspaaride arvust ning seega on pöörlemiskiiruste vahemik, milles elekrituulik on kasutatav, väike.

Tüüp 2 elekrituulikutes kasutatakse faasirootoriga asünkroongeneraatoreid. Aktiivvõimsuse reguleerimiseks kasutatakse nii turbiinilabade kaldenurga kui ka ergutusmähise takistuse muutmist. Tuulekiirustel alla nimikiiruse on ka elekrituuliku väljundaktiivvõimsus alla nimivõimsuse ja generaatori ergutusmähis on lühistatud ehk tuulik talitleb sarnaselt tüüp 1 elekrituulikuga. Tuulekiirustel üle nimikiiruse suurendatakse ergutusmähise takistust, et hoida aktiivvõimsus nimiväärtuse juures. Sellest tulenevalt on tuulekiiruste vahemik, milles tüüp 2 elekrituulik on võimalik kasutada, suurem. Samas tekitab ergutusmähiseid läbiv vool mähiste takistuse tõttu aktiivvõimsuskadusid ja seega eralduvat soojust. Selle vähendamiseks kasutatakse turbiinilabade kaldenurga muutmist. Ka tüüp 2 elekrituulikud tarbivad elektrisüsteemist alati reaktiivvõimsust.

Tänapäeval huvipakkuvamad elektrituulikud on kolmandat ja neljandat tüüpi. Tüüp 3 ehk DFIG (*Doubly-Fed Induction Generator*) elektrituulikute puhul kasutatakse sarnaselt tüüp 2 tuulikutega faasirooriga asünkroongeneraatoreid. Generaatori staatori mähised on ühendatud elektrisüsteemiga otse ja ergutusmähised läbi sagedusmuundurite. Muundurite kasutamise on võimalik ergutusmähiseid ergutada vajaliku sagedusega, mida reguleeritakse selliselt, et püsitalitlusel oleks rootori ja rootori magnetvoo pöörlemiskiiruse summa võrdne staatori magnetvoo pöörlemiskiirusega, mille määrab elektrivõrgu sagedus. Seega on võimalik energiat võrku anda nii alasünkroon-, sünkroon- ja ülesünkroonkiirusel. Madalatel tuulekiirustel ehk kui generaator töötab alasünkroonkiirusel tarbib rootor muunduri kaudu võrgust energiat ja seega edastatakse süsteemi energiat ainult staatori kaudu. Suurtel tuulekiirustel ehk kui generaator töötab ülesünkroonkiirusel edastatakse süsteemi energiat nii staatori kui ka rootori kaudu. Muunduri võimsus sõltub sellest kui suures tuulekiiruste ehk rootori pöörlemiskiiruste vahemikus soovitakse elektrituulikut kasutada. Muunduri juhtimiseks kasutatakse tavaliselt vektorjuhtimissüsteemi, millega on võimalik aktiiv- ja reaktiivvõimsust eraldi reguleerida.

Tüüp 4 ehk täismuunduriga elektrituulikute puhul kasutatakse tavaliselt elektriliselt ergutatud või püsomagnet rooriga sünkroongeneraatoreid. Generaator on elektrisüsteemi ühendatud läbi pingemuunduritel põhinevate sagedusmuundurite. Elektrituulikupoolse muunduriga reguleeritakse alalisvooluühenduse pinget ning elektrisüsteemipoolse muunduriga süsteemi edastatavat aktiiv- ja reaktiivvõimsust või süsteemist tarbitavat reaktiivvõimsust. Pingemuundurite toimimispõhimõtet vaadeldakse täpsemalt lõputöö jaotises 2.5. Tüüp 4 elektrituulikute eelised võrreldes tüüp 3 elektrituulikutega seisnevad selles, et püsomagnetitega generaatori korral ei ole tarvis kasutada ergutusmähiseid, mistõttu puuduvad ergutuskaod ja generaatori hoolduskulud on madalamad, kuna ei ole ka rootori kontaktrõngaid. Lisaks võib elektrituuliku pool olla sagedus erinev elektrisüsteemi põhisedusest, mistõttu ei ole käigukasti olemasolu vajalik. Puuduseks on asjaolu, et muundurite võimsus peab vastama elektrituuliku võimsusele, mistõttu on need kallimad ja kaod nendes suuremad. Allika [11] kohaselt kasutasid kõik aastatel 2007...2017 Eestis ülekandevõrguga ühendatud uued tuuleelektrijaamad täismuunduriga lahendust. Järgnevalt vaadeldakse elektrituulikute väljundaktiivvõimsuse sõltuvust tuulekiirusest, mis on põhiline elektrituulikute tööd piirav tegur ja mille näitlik karakteristik on esitatud joonisel 2.4.



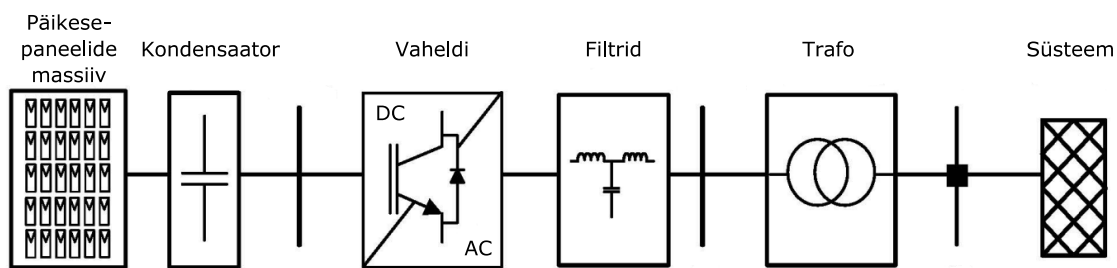
Joonis 2.4 Elektrituuliku väljundaktiivvõimsuse ja turbiinilabade kaldenurga sõltuvus tuulekiirusest [28]

Vastavalt joonisel 2.4 esitatud karakteristikule talitleb tuulekiirustel alla 5 m/s elektrituulik ooteseisundis ehk selle väljundaktiivvõimsus null ja turbiinilabade kaldenurk on 90°. Tuulekiirusel 5 m/s lülitatakse elektrituulik sisse ja turbiinilabade kaldenurk viiakse 0°-ni. Tuulekiiruste vahemikus 5...12 m/s tõuseb elektrituuliku väljundaktiivvõimsus koos tuulekiiruse kasvuga. Turbiinilabade kaldenurka seejuures ei muudeta ehk tuule kineetilist energiat kasutatakse maksimaalselt. Samas võib turbiinilabade kaldenurka muuta vastavalt vajadusele, et hoida teatud reservvõimsust. Tuulekiirusel 12 m/s, mis vastab elektrituuliku nimikiirusele saavutab tuulik nimivõimsuse. Tuulekiiruste vahemikus 12...25 m/s reguleeritakse turbiinilabade kaldenurka, et hoida tuuliku väljundvõimsus nimiväärtuse juures ehk osa tuule kineetilisest energiast jäetakse kasutamata. Tuulekiirustel üle 25 m/s keeratakse turbiinilabad tuulest täielikult välja. Eesmärgiks on siin kaitsta turbiini mehaanilisi komponente turbiinilabadele mõjuvate liiga suurte jõudude eest. Tegu on lihtsustatud selgitusega ja nagu eelnevalt mainitud ei pea väljundvõimsuse reguleerimist teostama ainult turbiinilabade kaldenurga muutmisega.

2.3 Päikeseelektrijaam

Päikeseelektrijaamade ülesehitust ja töö põhimõtteid on kirjeldatud allikates [22], [29], [30], [31] ja [32]. Päikesepaneelide aluseks on pooljuhist fotodiod, mille klemmide

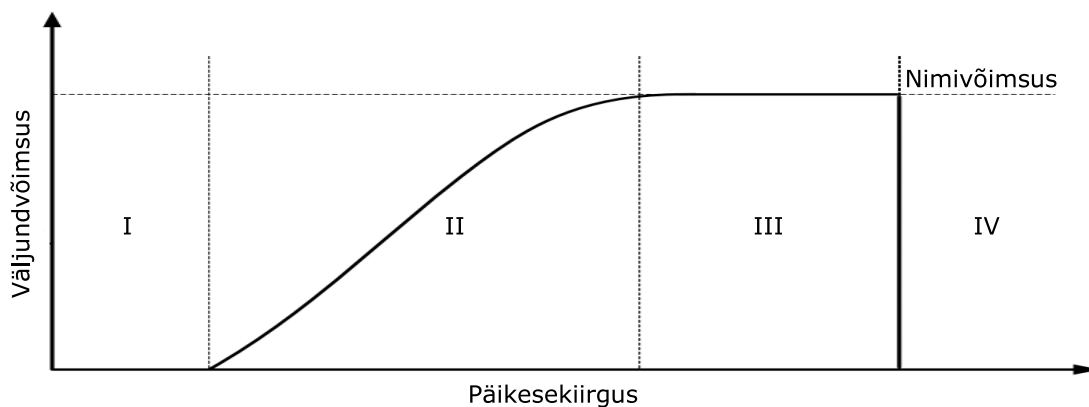
vahele tekib päikesekiirguse toimetel pinge. Päikesepaneelid koosnevad fotodiodide jada- ja paralleelühendustest ning päikesepaneelide alammassiivid üksikute paneelide jada- ja paralleelühendustest. Mõlemal juhul tõstetakse jadaühendustega paneeli või alammassiivi väljundpinget ja paralleelühendustega lubatud voolu. Päikeseelektrijaama alammassiivide ühendamise võimalusteks üheks süsteemiks on näiteks tsentraalne, string- või moodulühendused. Tsentraalse ühenduse puhul on päikesepaneelide süsteem ühendatud vahelduvvoolusüsteemiga läbi ühe keskse vaheldi. Stringühenduste puhul on iga alammassiiv ühendatud läbi DC-DC muundurite päikeseelektrijaama alalisvooluvõrku ja seejärel läbi ühe vaheldi vahelduvvoolusüsteemi. Moodulühenduste puhul on iga päikesepaneeli kohta eraldi vaheldi. Sarnaselt tüüp 4 elektrituulikutega kasutatakse ka päikeseelektrijaamades vaheldina tavaliselt pingemuundureid, mida vaadeldakse täpsemalt lõputöö jaotises 2.5. Joonisel 2.5 on esitatud päikeseelektrijaama põhimõtteskeem.



Joonis 2.5 Päikeseelektrijaama põhimõtteskeem [32]

Päikeseelektrijaama väljundvõimsus sõltub peamiselt päikesekiirgusest, fotodiodide temperatuurist ja päikesekiirguse nurgast paneelide suhtes. Joonisel 2.6 esitatud näitlik päikeseelektrijaama väljundaktiivvõimsuse sõltuvus päikesekiirgusest.

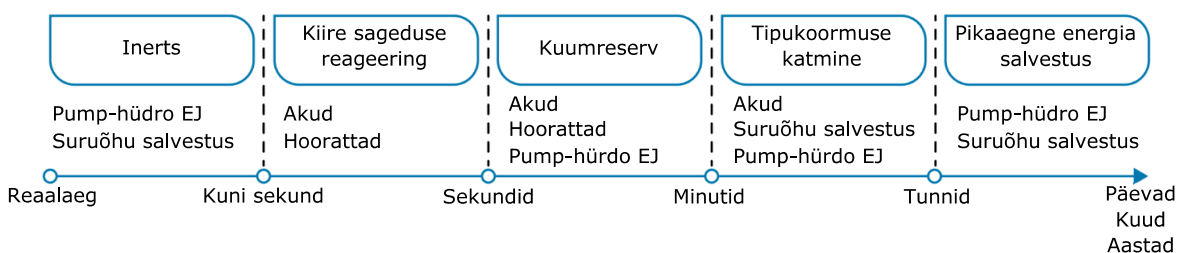
Joonisel 2.6 on näha, et päikeseelektrijaama väljundvõimsuse sõltuvus päikesekiirgusest on sarnane elektrituuliku väljundvõimsuse sõltuvusega tuulekiirusest. Joonisel 2.6 tähistab esimese ja teise regiooni vaheline piir päikesekiirgust, millest alates hakatakse aktiivvõimsust tootma. Teises regioonis suureneb päikeseelektrijaama väljundvõimsus koos päikesekiirguse tõusuga kuni saavutatakse nimivõimsusele vastav päikesekiirgus, mida tähistab teise ja kolmanda regiooni vaheline piir. Edasisel päikesekiirguse tõusul hoitakse nimivõimsust, mis tähendab aga seda, et alalisvoolusüsteemi pinge hakkab tõusma. Lisaks tõuseb kolmandas regioonis päikesekiirguse kasvuga ka fotodiodide temperatuur kuni saavutatakse kriitiline piir, mida joonisel tähistab kolmanda ja neljanda regiooni vaheline piir, ja päikesepaneelid lülitatakse välja. Joonisel esitatud aktiivvõimsuse kõver vastab siinkohal maksimaalselt saadaval olevale võimsusele. Juhtimissüsteemiga on võimalik siiski realselt toodetavat aktiivvõimsust vähendada, kuid see tõstab alalisvoolusüsteemi pinget.



Joonis 2.6 Päikeseelektrienergia aktiivvõimsuse sõltuvus päikesekiirgusest [32]

2.4 Akupank

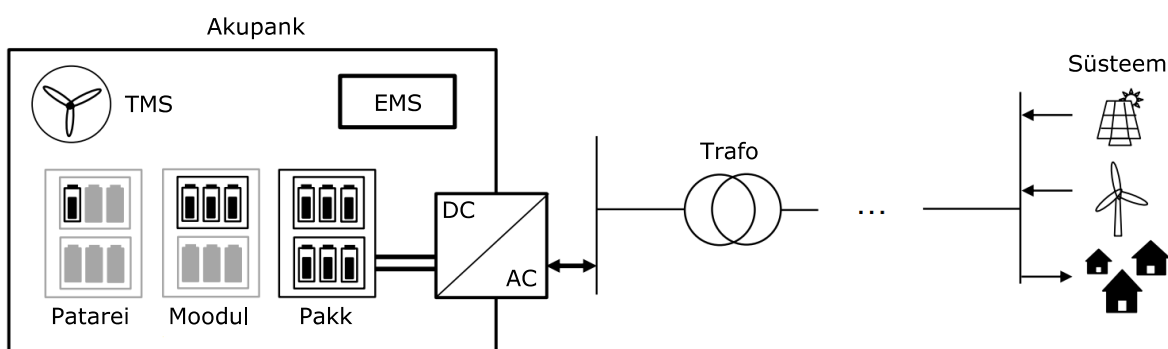
Seoses taastuvenergiaallikate üha suurema kasutusele võtuga energiasüsteemides on tähtsustunud ka salvestustehnoloogiate kasutamine. Erinevaid salvestustehnoloogiad ja nendega pakutavaid võimalikke süsteemiteenuseid on kirjeldatud allikates [33], [34] ja [35]. Üldiselt saab salvestustehnoloogiad jagada kaheks: mehaanilisteks ja keemilisteks tehnoloogiateks. Mehaanilised tehnoloogiad on näiteks pump-hüdro elektrijaamad, suruõhu salvestamine (CAES – *Compressed Air Energy Storage*) ja hoorattad. Keemiliseks tehnologiaks on akud, mida võib jagada vastavalt kasutatavatele keemilistele elementidele, näiteks pliiakud, nikkel-kaadmiumakud, liitiumioonakud ja naatriumkloriidakud. Salvestustehnoloogiatega on võimalik ühtlustada taastuvenergiaallikaid kasutatavate tootmisüksuste energiatoodangu muutlikkust. Lisaks on neid võimalik kasutada tipukoormuse katmiseks ja muude süsteemiteenuste pakkumiseks, näiteks sageduse reguleerimiseks, kuumreservi hoidmiseks ja pingetootmiseks. Erinevate salvestustehnoloogiatega pakutavaid süsteemiteenuseid ilmestab joonis 2.7.



Joonis 2.7 Erinevate salvestustehnoloogiatega pakutavad süsteemiteenused [34]

Lõputöös vaadeldakse täpsemalt liitiumioonakusid lähtuvalt nende kõrge reageerimiskiirusest, laiast töötemperatuuri vahemikust, madalast iseeneslikust tühjenemisest, kõrgest efektiivsusest ja energia tihedusest [35]. Lisaks leiti allikas [34] teostatud uuringu käigus, et liitiumioonakud on eelnevalt nimetatud salvestustehnoloogiatest kõige paremad näiteks taastuenergiaallikatest toodetud energia ühtlustamiseks, süsteemiteenuste pakkumiseks ja reaktiivvõimsuse reguleerimiseks.

Akupanga ehitust ja selle juhtimissüsteeme on kirjeldatud allikates [36] ja [37]. Akupanga aluseks on akupatarei, mis koosneb anoodist ja katoodist ehk vastavalt negatiivselt ja positiivselt laetud elektroodist, mille vahel on elektrolüüt. Akupatarei elektroodide vahele tarbija ühendamisel hakkavad elektronid liikuma anoodilt läbi tarbija katoodile ning akupatarei tühjeneb. Patarei sees liiguvad samal ajal liitiumioonid anoodilt katoodile. Akupatarei elektromotoorjõud ehk pinge tuleneb energiast, mis eraldub ühe elektroni vabanemisest tühjenemisprotsessi käigus. Eelnevalt lähtuvalt langeb akupatarei pinge selle tühjenedes kuna elektronide arv, mis saab vabaneda, väheneb. Tarbija asemel vooluringi pingeallika ühendamisel toimub vastupidine protsess ja akupatarei laadub. Sarnaselt päikeseelektrijaamadega koosneb akumoodul üksikute akupatareide jada- ja paralleelühendustest ja akupank moodulite jada- ja paralleelühendustest. Jadaühendustega tõstetakse akupanga pinget ja paralleelühendustega lubatud voolu ning mahtuvust. Akupanga põhimõtteskeem on esitatud joonisel 2.8.



Joonis 2.8 Akupanga põhimõtteskeem [37]

Jooniselt 2.8 on näha, et akupanga juurde kuuluvad ka soojuse reguleerimissüsteem (TMS – *Thermal Management System*) ja energia juhtsüsteem (EMS – *Energy Management System*). Soojuse reguleerimissüsteemi eesmärgiks on juhtida akupanga kütte- ja ventilatsioonisüsteemi tööd, et vältida akupatareid riknemist ja pikendada nende eluiga. Energia juhtsüsteemi eesmärgiks on reguleerida akupanga võimsust lähtuvalt piirväärtustest, juhtida tühjenemis- ja laadimistsükli ning võimsusvooge

erinevate moodulite vahel. Akupatareide väljundiks on alalispinge, seetõttu kasutatakse akupanga elektrisüsteemiga ühendamiseks sarnaselt elektrituulikute ja päikeselektrijaamadega tavaliselt pingemuunduritel põhinevaid sagedusmuundureid.

2.5 Pingemuunduritel põhinevad sagedusmuundurid

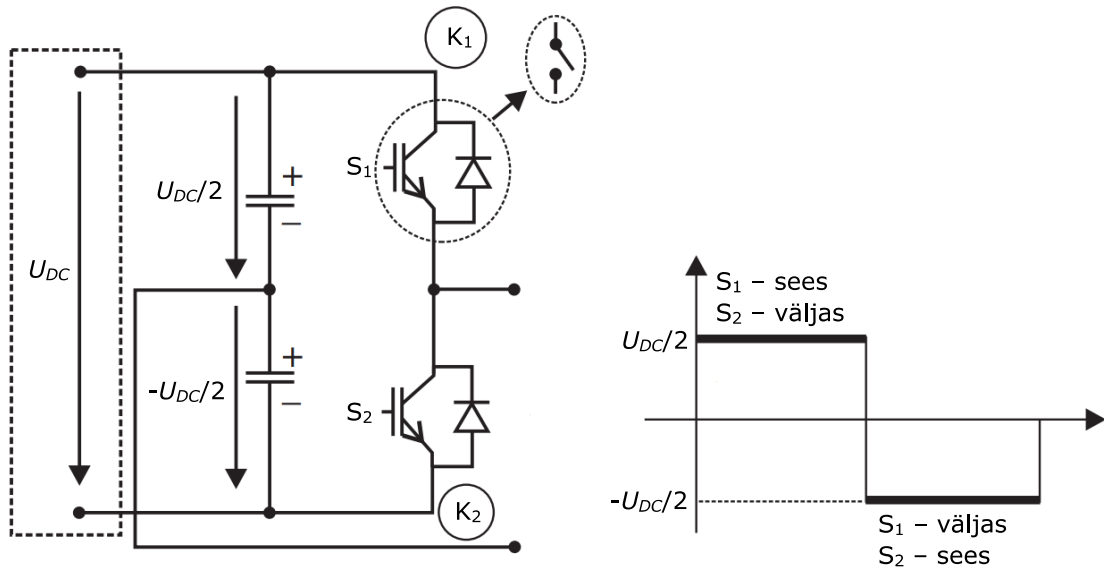
Alalisvoolu muundamiseks vahelduvvooluks ja vastupidi on võimalik kasutada näiteks voolu- või pingemuunduritel põhinevaid jõuelektroonikaseadmeid, mille põhiliseks erinevuseks on kasutatavad jõupooljuhid. Voolumuundurites kasutatakse türistorventiile, mille puhul on võimalik reguleerida ainult sisselülitushetke ja türistori väljalülitamiseks peab seda läbiv vool läbima nullpunkti. Seega on türistorid osaliselt juhitavad jõupooljuhid ja nende tööks on vajalik tugev vahelduvvoolusüsteem. Pingemuundurites kasutatakse isoleeritud paisuga bipolaar transistore ehk IGBT-sid (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). Erinevalt türistoridest on IGBT-si võimalik eraldi sisse ja välja lülitada ning seega ei ole tugeva vahelduvvoolusüsteemi olemasolu tähtis. Eelnevast tulenevalt on pingemuunduritel võrreldes voolumuunduritega mitmeid eeliseid [38]:

- aktiiv- ja reaktiivvõimsust on võimalik eraldi reguleerida;
- reaktiivvõimsust on võimalik reguleerida nii tarbimis- kui ka tootmissuunal,
- võimalik kasutada nõrga vahelduvvoolusüsteemi ühendamiseks;
- võimalik kasutada kustumud elektrisüsteemi pimekäivituseks, kuna sobiliku juhtimissüsteemiga on võimalik simuleerida sünkroongeneraatori funktsionaalsust;
- võimsuse ülekande minimaalne piir on madalam.

Pingemuundurite peamiseks puuduseks on nende maksimaalne võimsus, mis on madalam kui voolumuunduritel. Samas on pingemuundurite eelised lõputöö kontekstis olulisemad ja seega käsitletakse järgnevalt pingemuundureid elektrituuliku, päikeselektrijaama ja akupanga ühendamiseks vaadeldava tööstusettevõtte elektrivõrguga. Pingemuundurite ehitust, talitlust ning juhtimissüsteemi on kirjeldatud allikates [38] ja [39]. Elektrituulikute ja päikeselektrijaamade puhul on pingemuundurite juhtimissüsteemi kirjeldatud vastavalt allikates [27] ja [32].

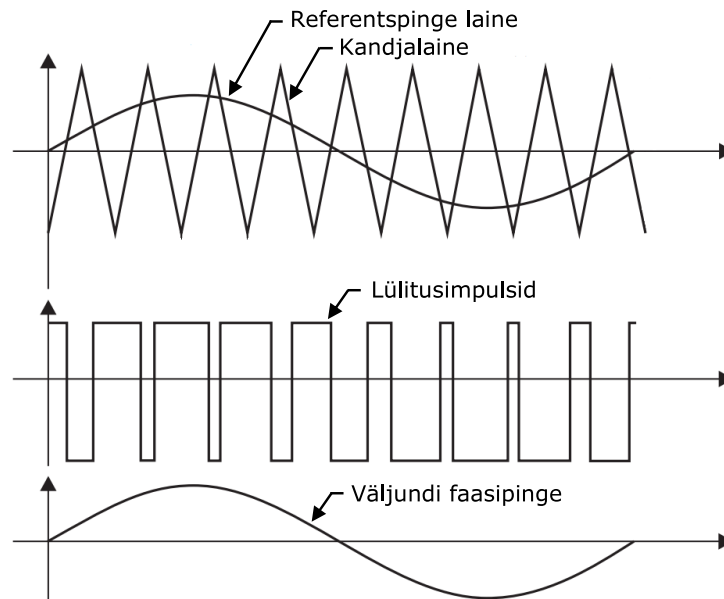
Pingemuundurite puhul on võimalik kasutada erinevaid topoloogiaid, millest enamlevinud on kaheastmelised, kolmeastmelised ja modulaarsed mitmeastmelised muundurid [39]. Nende põhiline erinevus seisneb transistorventiilide omavahelise ühendamise põhimõtetes ja vahelduvvoolusüsteemi poolses pingelaine kujus. Samas

kirjeldatakse pingemuundurite üldiseid põhimõtteid ja seega vaadeldakse lihtsaimat topoloogiat, ühefaasilist kaheastmelist muundurit, mille põhimõtteskeem ja väljundi pingelaine on esitatud joonisel 2.9.



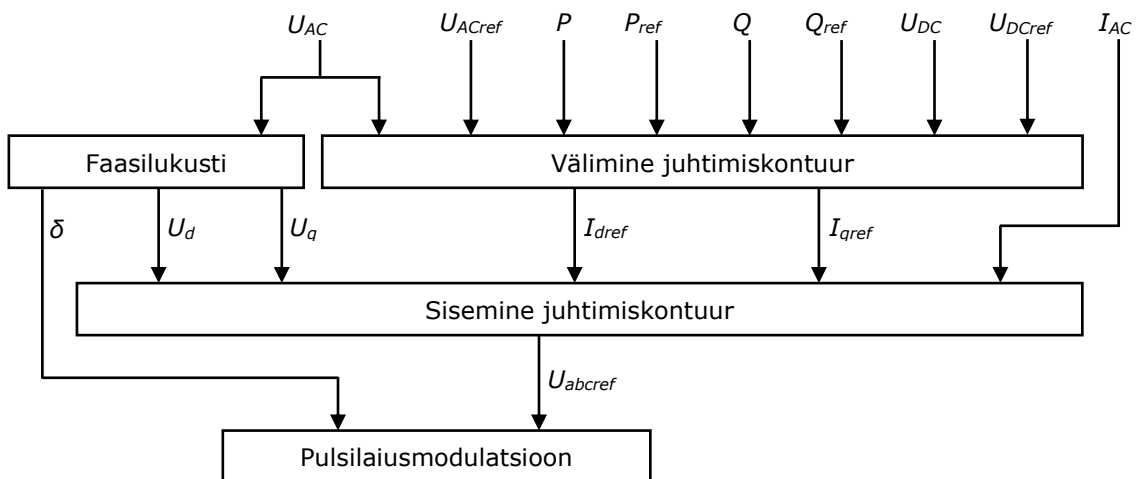
Joonis 2.9 Ühefaasilise kaheastmelise pingemuunduri põhimõtteskeem ja väljundi pingelaine [39]

Transistorventiilid on joonisel 2.9 tähistatud S_1 ja S_2 -ga ning nendega paralleelselt ühendatud diodidega saab neid vaadelda kui lüliteid K_1 ja K_2 . Lüliti K_1 sisse lülitamisel ühendatakse väljundterminal A alalisvoolusüsteemi positiivse polaarsusega poolega ja seega on väljundterminali pinge nullpunkti M suhtes positiivne. Ventiiil S_2 on samal ajal blokeeritud ehk lüliti K_2 on väljas. Väljundpinge muutmiseks lülitatakse K_1 välja ja K_2 sisse. Mõlema lüliti samaaegsel sisselülitusel tekib lühis, mis võib ventiilid lõhkuda. Ühefaasilisel kaheastmelisel muunduril on seega kaks väljundpingeaset ning väljundpinget 0 V ei ole võimalik saavutada. Kolmefaasiline pingemuundur on ülesehituselt sarnane. Sellisel juhul on lülititest K_1 ja K_2 koosneva haruga paralleelselt ühendatud kaks samasugust haru, kust saadakse teiste faaside pinged. Kolmeastmelise pingemuunduriga on seejuures võimalik saavutada ka väljundpinge 0 V. Suuremate astmete arvu korral tõuseb ka pingeastmete arv, mida on väljundis võimalik saavutada. Lisaks on jooniselt 2.9 näha, et muunduri väljundpinge ei ole siinuseline. Olukorra parandamiseks on võimalik kasutada pulsilaiusmodulatsiooni, mille näitlikud graafikud kaheastmelise muunduri korral on esitatud joonisel 2.10.



Joonis 2.10 Pulsilaiusmodulatsiooni näitlikud graafikud [39]

Pulsilaiusmodulatsiooni rakendamiseks edastatakse vastavale juhtimissüsteemi lülile siinuseline referentspinge, mille sagedus on võrdne vahelduvvoolussüsteemi sagedusega. Plokk genereerib kolmnurkse kandjalaine, mille väärtusi võrreldakse referentspingega. Joonisel 2.10 on need pinged esitatud esimesel graafikul. Juhul kui referentspinge väärtus on suurem kui kandjalaine väärtus lülitatakse sisse lüliti K_1 (joonis 2.9) ja seega on väljundis pinge positiivne. Vastupidisel juhul lülitatakse sisse lüliti K_2 ja väljundis on pinge negatiivne. Lülitite lülitusimpulsid on joonisel 2.10 esitatud keskmisel graafikul ning muunduri väljundi faasipinge viimasel graafikul. Pingemuundurite juhtimiseks on võimalik kasutada vektorjuhtimissüsteemi $dq0$, mille eesmärgiks on sätte- ja mõõteväärtuste alusel luua referentspinge laine, mis edastatakse pulsilaiusmodulatsiooni plokkile. Vektorjuhtimissüsteemi näitlik plokk skeem, mis koostati allika [39] alusel, on esitatud joonisel 2.11.



Joonis 2.11 Vektorjuhtimissüsteemi näitlik plokk skeem [39]

Joonisel 2.11 esitatud vektorjuhtimissüsteemi põhilisteks osadeks on välimine ja sisemine juhtimiskontuur, pulsilaiusmodulatsiooni plokk ja faasilukusti (PLL – *Phase Locked Loop*). Juhtimine toimub vahelduvvoolusüsteemi pingel (U_{ac} ja U_{acref}) või reaktiivvõimsuse (Q ja Q_{ref}) ja aktiivvõimsuse (P ja P_{ref}) või alalisvoolusüsteemi pingel (U_{DC} ja U_{DCref}) alusel. Alaindeks *ref* tähistab sätteväärtust. Välimises juhtimiskontuuris arvutatakse reguleeritavate suuruste mõõte- ja sätteväärtuste alusel $dq0$ süsteemi referentsvooluvektorid (I_{dref} ja I_{qref}), mis on sisendiks sisemisele juhtimiskontuurile. Selles arvutatakse referentsvooluvektorite ning mõõdetud voolu ja pingevektorite (I_{AC} , U_d ja U_q) alusel referentspingevektorid, mis teisendatakse tagasi faasipingeteks (U_{abcref}) ning edastatakse pulsilaiusmodulatsiooni plokkile. Mõõdetud vool teisendatakse $dq0$ süsteemi sisemises juhtimiskontuuris. Lisaks on juhtimissüsteemis faasilukusti, milles vahelduvpinge üks faas lukustatakse $dq0$ süsteemi d või q teljega. Faasilukusti eesmärgiks on muunduri väljundi sünkroniseerimine vahelduvvoolusüsteemiga.

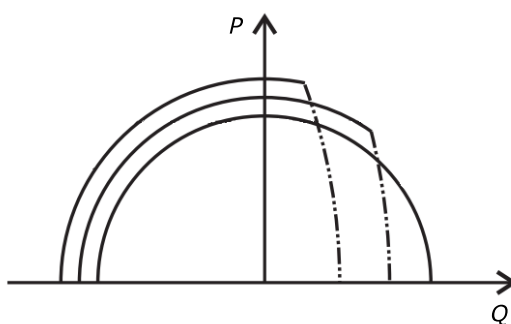
Vektorjuhtimissüsteemis kasutatakse faasipingete ja -voolude teisendamist $dq0$ süsteemi ajas konstantsete väärtustega vektorite tekitamiseks. Vaadeldes faasiväärtusi ajateljel on tegu kolme siinuseliselt muutuva lainega. Nende lainete faasorsummat on võimalik igas ajahetkes kirjeldada seisva $\alpha\beta$ koordinaadistiku α ja β väärtustena. Sellisel juhul saadakse kaks siinuselisena muutuvat lainet. Järgnevalt minnakse üle pöörlevasse $dq0$ koordinaadistikku. Selleks on vaja teada faasorite nurkkiirust, mis saadakse faasilukustist. Kujutades $dq0$ süsteemi faasoreid ajateljel ei ole tegu enam siinuslainete, vaid kahe horisontaalse sirgega, mis tähendab, et püsitalitlusel on referentsvoolude ja -pingete väärtused konstantsed.

Pingemuundurite juhtimissüsteemi täpsem ülesehitus sõltub sellest, mis liiki tootmisüksuse ühendamiseks vahelduvvoolusüsteemiga seda kasutatakse. Elektriülikute puhul kasutatakse kahte muundurit, esimene muundab elektriüliku vahelduvvoolu alalisvooluks ja teine alalisvoolu vahelduvvooluks. Sellisel juhul reguleerib elektriülikupoolne muundur alalisvooluühenduse pinget. Arvestamata kadudega alalisvooluühenduses peab konstantse alalisvoolusüsteemi pinget hoidmiseks sealt väljuv vool olema võrdne siseneva vooluga. Võrgupoolse muunduri eesmärgiks on reguleerida alalisvooluühendusest väljuvat voolu ja vahelduvvoolusüsteemi edastatavat või sealt tarbitavat reaktiivvõimsust.

Päikeseelektrijaama puhul on juhtimissüsteemil kolm ülesannet, maksimaalse võimsuse järgimine (MPPT – *Maximum Power Point Tracking*), muunduri juhtimine ning aktiiv- ja reaktiivvõimsuse reguleerimine. MPPT plokis leitakse mõõdetud päikesekiirguse, temperatuuri, päikesepaneelide massiivi voolu ja alalisvoolusüsteemi pingel alusel pinget

väärtus, mille puhul on päikeseelektriijaama väljundvõimsus maksimaalne ning mis edastatakse aktiiv- ja reaktiivvõimsuse reguleerimisplokki. Selle ploki sisenditeks on ka aktiiv- ja reaktiivvõimsuse sätte- ja mõõteväärtused ning alalisvoolusüsteemi pinge. Juhtimissüsteemi viimaseks plokiks on muunduri juhtplokk, mille ülesandeks on vahelduvvoolusüsteemiga sünkroniseerimine, pinge moduleerimine ja alalispinge reguleerimine. Akupanga juhtimissüsteem on sarnane päikeseelektriijaama juhtimissüsteemiga, kuid selles puudub MPPT plokk. Järgnevalt kirjeldatakse tegureid, mis piiravad pingemuunduritega vahelduvvoolusüsteemi edastatavat aktiiv- ja reaktiivvõimsust.

Referentspinge faasi nihutamisega vahelduvvoolusüsteemi pinge suhtes on võimalik reguleerida edastatavat aktiivvõimsust ja amplituudi muutmisega süsteemi edastatavat või sealt tarbitavat reaktiivvõimsust. Maksimaalselt ülekantavat aktiivvõimsust piirab pingemuunduri lubatud vool. Lisaks ei saa ülekantav võimsus olla suurem elektrituuliku, päikeseelektriijaama või akupanga väljundvõimsusest. Reaktiivvõimsuse ülekannet piiravad alalis- ja vahelduvvoolusüsteemide pinged ning muunduri nimivõimsus. Juhul kui muunduri nimivõimsus on võrdne tootmiseadme nimivõimsusega, ei ole maksimaalse aktiivvõimsuse korral võimalik reaktiivvõimsust toota ega tarbida. Eeldades, et aktiivvõimsus ei piira reaktiivvõimsuse reguleerimist, on maksimaalne reaktiivvõimsus võimalik vahelduvvoolusüsteemi edastada juhul kui vahelduvvoolusüsteemi pinge on minimaalne ja alalisvoolusüsteemi pinge maksimaalne. Vahelduvvoolusüsteemi kõrgematel pingetel piirab sinna edastatavat reaktiivvõimsust alalisvoolusüsteemi maksimaalne pinge. Pingemuundurite näitlik PQ karakteristik on esitatud joonisel 2.12.



Joonis 2.12 Pingemuundurite näitlik PQ karakteristik [39]

Joonisel 2.12 tähistavad välimise ja keskmise kaar olukorda, kus vahelduvvoolusüsteemi pinge on alalisvoolusüsteemi pingest kõrgem ja seega on vahelduvvoolusüsteemi edastatav reaktiivvõimsus piiratud. Sisemine kaar tähistab olukorda, kus vahelduvvoolusüsteemi pinge on alalisvoolusüsteemi pingest madalam ja seega ei ole edastatav reaktiivvõimsus piiratud.

3. MUDELI JA JUHTALGORITMIDE ÜLESEHITUS REAALAJASIMULAATORIS

Käesolevas peatükis kirjeldatakse elektrisüsteemi reaalaajasimulaatorit RTDS (*Real-Time Digital Simulator*) ja sellega kaasnevat modelleerimistarkvara RSCAD, lõputöö aluseks oleva tööstusettevõtte elektrivõrku ja tootmisüksuste modelleerimist. Sellele järgnevalt keskendutakse aktiiv- ja reaktiivvõimsuse jaotamise võimalustele tootmisüksuste vahel. Viimasena selgitatakse koostatud juhtalgoritmide põhimõtteid ja nende programmipõhist ülesehitust.

3.1 Reaalaajasimulaatori ülevaade

Reaalaajasimulaator RTDS [40] on algselt elektromagnetiliste transientide uurimiseks väljaarendatud riistvara. Nimetatud seade on toimimispõhimõtetelt ülesehitatud nii, et tagada kõrge arvutuskiirus, mis on vajalik pidevaks reaalaajaliseks toimimiseks. Lähteseades on RTDS-i arvutussammu pikkus 50 μ s, mis tähendab, et reaalaajas töötamiseks peavad olema kõik võrguarvutused ja loogikalülitused teostatud realselt sama ajavahemiku jooksul. Võrdluseks võib tuua modelleerimistarkvara PSCAD, kus on samuti võimalik arvutussammu pikkuseks määrata 50 μ s, kuid PSCAD-is ei ole arvutussammupikkus seotud tegeliku ajaga ja seega ei ole tegu enam reaalaajalise simulatsiooniga. Lisaks on reaalaajasimulaatoriga võimalik kasutada *hardware-in-loop*-i ehk sellega saab ühendada erinevaid releekaitseseadmeid, kontrollereid jm, mida soovitakse enne reaalselt kasutust katsetada.

Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi elektrisüsteemide laboris olev reaalaajasimulaator koosneb kahest stendist ehk *rack*-ist, millest mõlemas on neli protsessorikaarti PB5 ja üks GTWIF kaart. Lisaks on esimeses *rack*-is ka üks GTNETx2 kaart. Igal PB5 protsessorikaardil on kaks eraldiseisvat protsessorit, mille võimalikeks ülesanneteks on elektrisüsteemi talitluse, elektrisüsteemi komponentide, süsteemi juhtlülide ja lühikese ajasammuga (*small time-step*) jõuelektroonika elementide arvutused. Eelnevast loetelust viimane erineb ülejäänud ülesannetest arvutussammupikkuse poolest, milleks on 2...3 μ s. Reaalaajasimulaatori kasutajal on võimalik määrata iga protsessori ülesanne, kuid kahte erinevat tüüpi ülesannet ei ole võimalik ühele protsessorile määrata. GTNETx2 kaart võimaldab kasutada erinevaid sideprotokolle, näiteks IEC 61850 GOOSE ja IEC 60870-5-104,

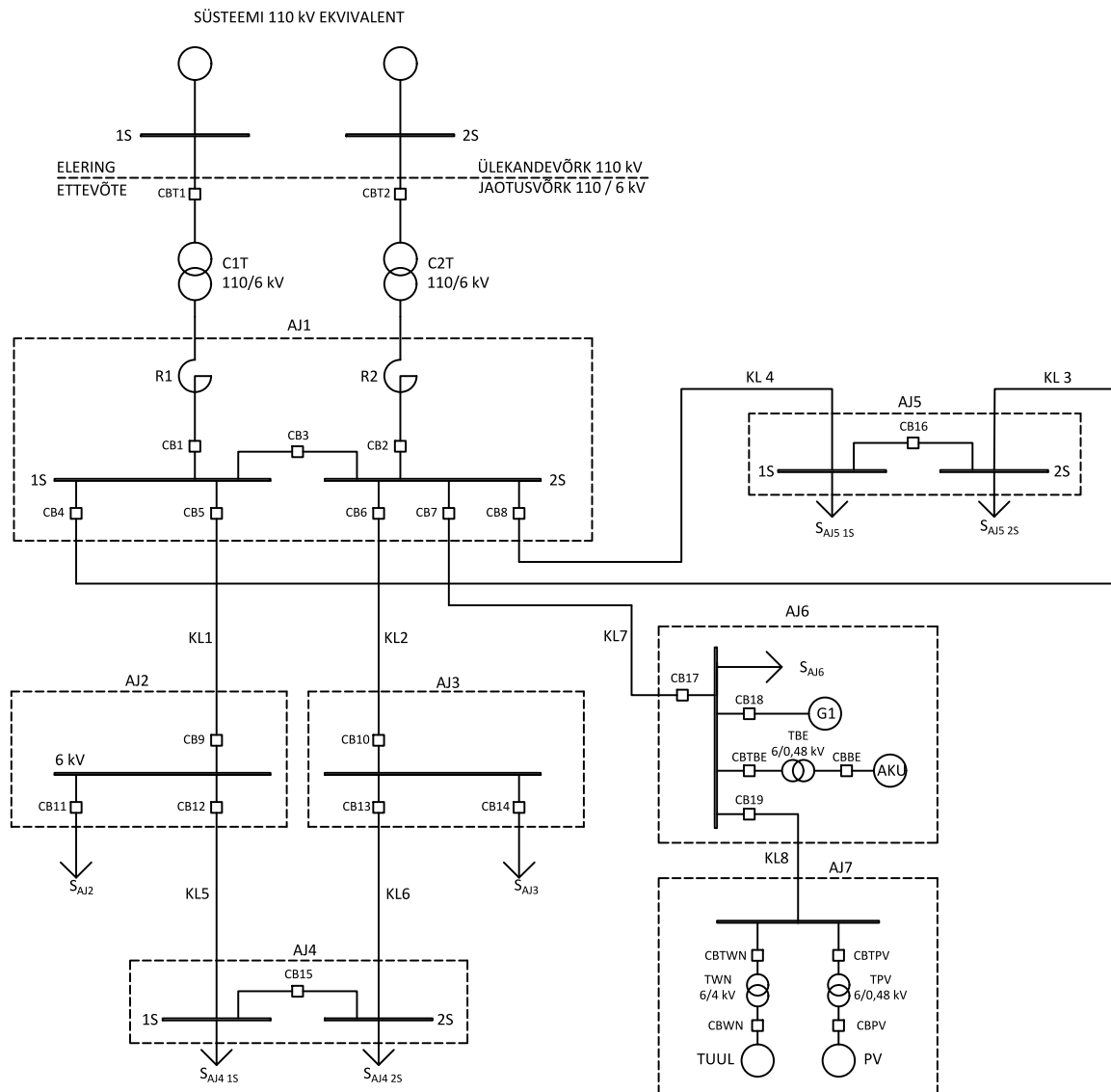
andmete edastamiseks reaalajasimulaatori ja teiste seadmete vahel. GTWIF kaardi ülesandeks on side haldamine reaalajasimulaatori ja RSCAD-i vahel, *rack*-ide töö sünkroniseerimine, kui simulatsiooni jooksutatakse mitmel *rack*-il korraga, side haldamine protsessorite vahel ja diagnostika läbiviimine. Lisaks on mõlema *rack*-iga ühendatud GTDI, GTDO, GTAI ja GTAO kaardid, millega on võimalik vastavalt digitaalsignaale vastu võtta ja saata ning analoogsignaale saata ja vastu võtta.

Reaalajasimulaatori kasutamiseks loodud tarkvaras RSCAD on võimalik koostada, simuleerida ja analüüsida elektrisüsteemide mudeleid. RSCAD-i põhilised alamsüsteemid on *Draft* ja *Runtime*. Esimeses koostatakse modelleeritav süsteem RSCAD-i kataloogides olevatest elektrisüsteemi ja loogika komponentidest. Teises toimub eelnevalt koostatud süsteemi simuleerimine. Lisaks on *Runtime*-s võimalik luua erinevaid moodsid ja graafikuid ning kasutada eelnevalt *Draft*-is lisatud nuppe ja lüliteid erinevate lülituse teostamiseks simulatsiooni ajal. Sõltuvalt eesmärgist, milleks reaalajasimulaatorit kasutatakse, ja simulatsiooni vajalikust täpsusest võivad olulised olla ka RSCAD-i alamsüsteemid *Cable* ja *T-Line*, kus on võimalik koostada täpsed kaabel- või õhuliinide mudelid, mida saab hiljem *Draft*-is kasutada.

3.2 Käsitletava tööstusettevõtte elektrivõrgu ülevaade

Käsitletava tööstusettevõtte elektrivõrk koosneb kahest osast, vanast ja uuest, mis lõputöö koostamise ajal olid üksteisest eraldatud. Lõputöö seisukohalt pakub huvi uus võrguosa, mille põhimõtteskeem on esitatud joonisel 3.1, ja mida modelleeriti RSCAD-is. Uut võrguosa ühendavad ülekandevõrguga trafod C1T ja C2T, mis kuuluvad vaadeldavale tööstusettevõttele ja seega on liitumispunkt pingestmel 110 kV. Ülekandevõrku modelleeriti RSCAD-is kahe ekvivalentse pingesallikaga. Lühisvoolude piiramiseks on mõlema trafo alampingepoolel reaktorid R1 ja R2, mida modelleeriti induktiivsete elementidena. Kõik koormused modelleeriti eraldi aktiiv- ja reaktiivkoormustena. Põhjuseks on asjaolu, et koormuse vähendamist sooviti teostada aktiiv- ja reaktiivkoormuste puhul eraldi, kuid RSCAD-is ei ole tarbija modelleerimisel ühe koormusena see võimalik. Tulevikus on plaanis vana ja uus võrguosa omavahel, kuid lõputöö koostamise ajal ei olnud kindlat plaani, milliste alajaamade kaudu seda tehakse. Seega käsitleti vana võrguosa lihtsustatult ehk kõik vana võrguosa koormused summeeriti ning lisati alajaamasse AJ2 ja AJ3. Elektrivõrgus olemasolev koostootmisjaama sünkroongeneraator (joonisel 3.1 G1) modelleeriti ettevõttest saadud andmete põhjal. Tööstusettevõtte elektrivõrku lisati tuule- ja päikeseelektrijaam

ning akupank, sest generaator üksi ei ole võimeline kogu koormust katma. Akupank ühendati otse alajaama AJ6 lattidele. Tuule- ja päikeseelektrijaamade asukoht valiti Eesti Maa-ameti geoportaali [41] alusel, mis asub alajaamast AJ6 ühe kilomeetri kaugusel, joonisel 3.1 alajaam AJ7. Tootmisüksuste mudeleid on täpsemalt kirjeldatud lõputöö järgnevates jaotistes. Kõik vaadeldava elektrivõrgu liinid on kaabelliinid, mille andmed saadi tööstusettevõttest ja mida modelleeriti PI-aseskeemidega.



Joonis 3.1 Käsitletava tööstusettevõtte elektrivõrgu uue võrguosa põhimõtteskeem

Ülekandevõrgu kohta oli lõputöö lähteandmetes antud selle nimipinget U_{nQ} , lühistakistus S_{kQ} , aktiiv- ja reaktiivtakistuse suhe a ning pingetegur c_Q . RSCAD-is oli süsteemi modelleerimiseks vaja teada selle nimipinget, aktiivtakistust ja induktiivsust. Süsteemi näivtakistus Z_Q arvutati avaldisega 3.1, reaktiivtakistus X_Q avaldisega 3.2, induktiivsust L_Q avaldisega 3.3 ja aktiivtakistus R_Q avaldisega 3.4 [42]. Ülekandevõrgu modelleerimiseks kasutatud parameetrid on esitatud tabelis 3.1. Tabelis 3.2 on esitatud

trafode C1T ja C2T parameetrid, tabelis 3.3 kaabelliinide ja reaktorite parameetrid ning tabelis 3.4 koormused, mille parameetrid saadi tööstusettevõttest.

$$Z_Q = c_Q \frac{U_{nQ}^2}{S_{kQ}''} = 1 \cdot \frac{117^2}{597,8} = 22,899 (\Omega) \quad (3.1)$$

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1+a^2}} = \frac{22,899}{\sqrt{1+0,22^2}} = 22,364 (\Omega) \quad (3.2)$$

$$L_Q = \frac{X_Q}{2\pi f} = \frac{22,364}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,0712 (H) \quad (3.3)$$

$$R_Q = \sqrt{Z_Q^2 - X_Q^2} = \sqrt{22,899^2 - 22,364^2} = 4,921 (\Omega) \quad (3.4)$$

Tabel 3.1 Ülekandevõrgu modelleerimiseks kasutatud parameetrid

Nimipinge U_{nQ}, kV	117
Lühistakistus S_{kQ}'', MVA	597,8
Aktiiv- ja reaktiivtakistuse suhe a	0,22
Pingetegur c_Q	1
Näivtakistus Z_Q, Ω	22,899
Reaktiivtakistus X_Q, Ω	22,364
Induktiivsus L_Q, H	0,0712
Aktiivtakistus R_Q, Ω	4,921

Tabel 3.2 Trafode C1T ja C2T parameetrid

Nimivõimsus, MVA	40
Ülempinge, kV	115
Alampinge, kV	6,6
Lühispinge, %	10
Rauaskadu, kW	25
Vaseskadu, kW	100
Lülitusgrupp	YNd11

Tabel 3.3 Liinide ja reaktorite parameetrid

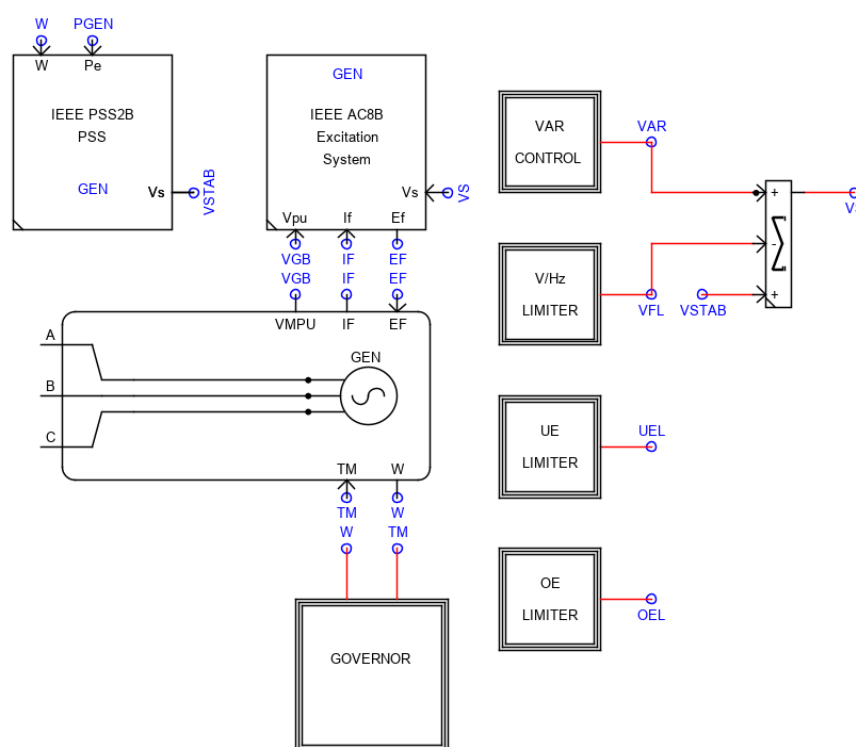
Liin	R, Ω	X_L, Ω	X_C, MΩ	Reaktor	L, H
KL1	0,00333	0,00260	0,028800	R1	0,00045
KL2	0,00333	0,00260	0,028800	R2	0,00045
KL3	0,02600	0,02450	0,000667		
KL4	0,02600	0,02450	0,000667		
KL5	0,02830	0,02210	0,003390		
KL6	0,02830	0,02210	0,003390		
KL7	0,03900	0,03680	0,004000		
KL8	0,03330	0,03140	0,002080		

Tabel 3.4 Elektrivõrgu koormuste parameetrid

Tarbija	P, MW	Q, Mvar
S_{AJ2}	4,30	0,81
S_{AJ3}	8,69	2,55
S_{AJ4} 1S	2,07	0,95
S_{AJ4} 2S	2,24	0,75
S_{AJ5} 1S	2,20	0,42
S_{AJ5} 2S	1,40	0,26
S_{AJ6}	0,60	0,22

3.3 Koostootmisjaama sünkroongeneraatori mudel

Tööstusettevõtte uues võrguosas on sünkroongeneraatoriga koostootmisjaam, mille elektriline niminäivvõimsus on 9,125 MVA. Generaatori maksimaalne aktiivvõimsus on 0,78 s.ü ehk ligikaudu 7,12 MW, minimaalne aktiivvõimsus 0,3 MW ehk ligikaudu 0,0329 s.ü ja nimipinge 6,3 kV. Generaatori mudelis koosneb turbiini kiirusregulaatorist, ergutusüsteemist, elektrisüsteemi võnkesummutist, V/Hz piirajast, reaktiivvõimsuse regulaatorist ning üle- ja alaergutuspiirajatest, mille loogikaskeemid ja parameetrid saadi tööstusettevõttest. Generaator koos nimetatud lisasüsteemide ja nende vaheliste ühendustega on esitatud joonisel 3.2.

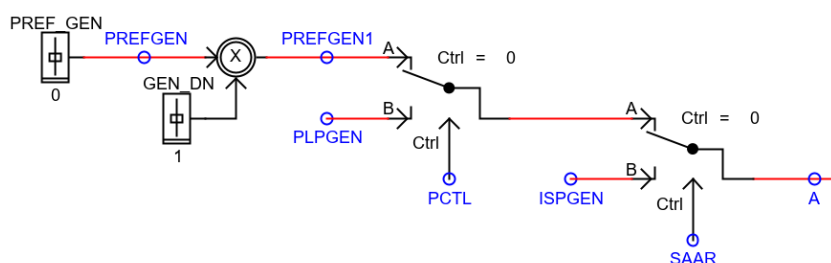


Joonis 3.2 Generaator (GEN), turbiini kiirusregulaator (GOVERNOR), ergutusüsteem (IEEE AC8B Excitation System), elektrisüsteemi võnkesummuti (IEEE PSS2B PSS), reaktiivvõimsuse regulaator (VAR CONTROL), V/Hz piiraja (V/Hz LIMITER), alaergutuspiiraja (UE LIMITER) ja üleergutuspiiraja (OE LIMITER)

Joonisel 3.2 esitatud generaatori tööks vajalikud lisasüsteemid koosnevad erinevatest loogika- ja arvutuslülidest. Generaatori ergutusüsteem ja elektrisüsteemi võnkesummuti põhinevad vastavalt IEEE AC8B ja IEEE PSS2B [43] tüüpudelitel, mille modelleerimiseks kasutati RSCAD-i komponentide kataloogi vastavaid mudeleid. Valismudelitel kasutamisel on võimalik muuta nendes sisalduvate arvutuslülide väärtusi, näiteks integraatorlülid ajakonstante, kuid mitte loogikalülitusi. Turbiini kiirusregulaator põhineb WSIEG1 tüüpudelil, mis oli ka RSCAD-i komponentide kataloogis olemas, kuid selle kasutamisel on võimalik turbiini võimsust muuta ainult

Runtime-s. Elektrivõrgu juhtalgoritmide rakendamisel oli oluline turbiini võimsuse muutmine ka teiste juhtsignaalide kaudu. Seega koostati samasugune mudel erinevate loogika- ja arvutuslülidega ise. Samuti koostati ettevõttest saadud andmete põhjal ise ka reaktiivvõimsuse regulaator, V/Hz piiraja ning üle- ja alaergutuspiirajad, mida RSCAD-i komponentide kataloogis ei ole.

Turbiini kiirusregulaatori sisendiks on generaatori rootori nurkkiirus (joonisel 3.2 W). Lisaks on kiirusregulaatori mudelis sujuvlülid (*slider*) turbiini võimsuse manuaalseks reguleerimiseks ja ümberlülid teistele juhtsignaalidele. Kiirusregulaatori väljundiks on mehaaniline moment (joonisel 3.2 TM), mis saadetakse tagasi generaatorisse. Turbiini võimsuse reguleerimiseks ja ümberlülitamiseks teistele juhtsignaalidele koostati joonisel 3.3 esitatud loogikalülitus.



Joonis 3.3 Turbiini võimsuse reguleerimiseks ja ümberlülitamiseks teistele juhtsignaalidele koostatud loogikalülitus

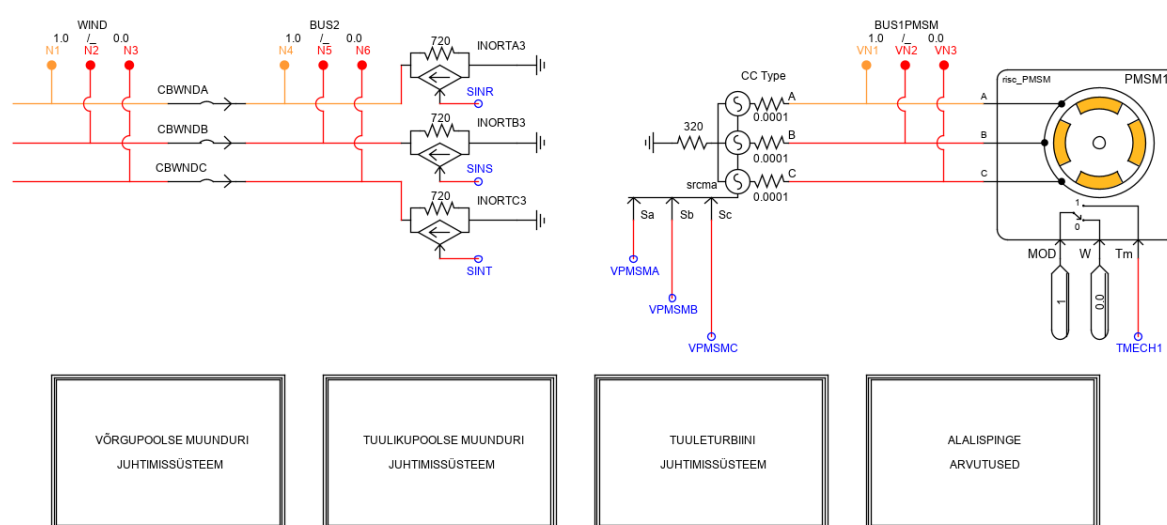
Joonisel 3.3 on esitatud turbiini võimsuse manuaalseks reguleerimiseks kasutatud sujuvlülid *PREF_GEN* ja *GEN_DN*. *PREF_GEN* väärtust arvestati kui maksimaalset aktiivvõimsust, mida generaator on teatud soojusenergiatoodangu korral võimeline tootma. Sujuvlülitiga *GEN_DN* saab generaatori aktiivvõimsust manuaalselt alla reguleerida. Lisaks on joonisel 3.3 esitatud ümberlülid, mille juhtimiseks kasutatakse signaale *PCTL* ja *SAAR*. Nimetatud signaalide aktiveerumisel lülitatakse turbiini võimsuse sätevärtus ümber õige regulaatori väljundile, mida joonisel 3.3 tähistavad *PLPGEN* ja *ISPGEN*. Loogikalülituse väljundiks on turbiini aktiivvõimsuse sätevärtus, mida joonisel 3.3 tähistab signaal *A*.

Generaatori ergutussüsteemi põhilisteks sisenditeks on generaatori klemmipinge (joonisel 3.2 *VGB*) ja ergutusvool (joonisel 3.2 *IF*) ning väljundiks ergutuspinge (joonisel 3.2 *EF*). Üle- ja alaergutuspiirajad on ergutussüsteemiga seotud läbi vastavate mudelite väljundsignaalide (joonisel 3.2 vastavalt *OEL* ja *UEL*), mis on ergutussüsteemi komponendis defineeritud samade nimedega. Elektrisüsteemi võnkesummuti koos reaktiivvõimsuse regulaatori ja V/Hz piirajaga on seotud ergutussüsteemiga läbi selle

sisendi VS. Elektrisüsteemi võnkesummuti toimib generaatori rootori nurkkiiruse ja generaatori aktiivvõimsuse (joonisel 3.2 PGEN) kaudu.

3.4 Tuuleelektrijaama mudel

Tuuleelektrijaama modelleeriti ühe ekvivalentse neljandat tüüpi elektrituulikuga, mille mudel ja juhtimissüsteemid saadi RSCAD-i näitemudelitest. Turbiini nimiaktiivvõimsus on 5 MW, mis saavutatakse tuulekiirusel 12 m/s. Elektrituuliku generaator on püsimagneetiga sünkroongeneraator nimipingega 4 kV. Pingemuundureid modelleeriti lihtsustatult ehk tuulikupoolset muundurit asendab pingeallikas ja võrgupoolset muundurit voluallikas. Seega modelleeritakse alalisvooluühendust pinge arvutuste kaudu. Lisaks ei ole muundurite nimivõimsused mudelis määratavad. Eeldati, et tuulekiirus on võrdne või ületab harva 12 m/s ja seega valiti muundurite nimivõimsusteks 5 MVA, mida käsitletakse elektrituuliku mudelis ja koostatud juhtalgoritmides piirväärtustena. Tuuleelektrijaama mudel on esitatud joonisel 3.4.



Joonis 3.4 Tuuleelektrijaama mudel

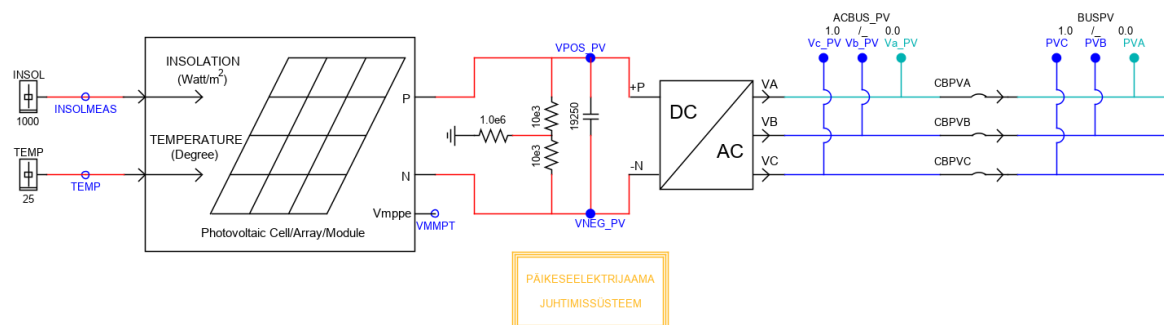
Võrgupoolse muunduri juhtimissüsteemis arvutatakse voluallika väljundvoolu lained (joonisel 3.4 SINR, SINS ja SINT). Põhimõtteliselt võib sellega ühendatud võrgu pinge olla suvaline, kuid arvestades, et generaatori väljundpinge on 4 kV ja elektrivõrgu pinge 6,3 kV, ühendati tuuleelektrijaam võrku läbi 6,3/4 kV trafo. Voolulained arvutatakse alalisvooluühenduse pinge ja reaktiivvõimsuse sätteväärtuste alusel. Reaktiivvõimsust on sarnaselt koostootmisjaama turbiini aktiivvõimsusega võimalik reguleerida

manuaalselt ja automaatselt. Selleks on juhtimissüsteemis vastavad ümberlülitid, millega valitakse õige reaktiivvõimsuse sätteväärtus.

Alalisvooluühenduse pingeks oli mudelis määratud 7,56 kV, mis hoitakse konstantsena joonisel 3.4 esitatud pingeaallika ja võrgu poolt mõõdetud aktiivvõimsuste võrdsena hoidmise teel. Seega on mõlemad pingemuundurid alalisvooluühenduse pinge kaudu jäigalt seotud ja võrgupoolse muunduri kaudu ei ole võimalik võrku edastatavat aktiivvõimsust reguleerida. Tuuleelektrijaama väljundaktiivvõimsuse reguleerimiseks kasutati turbiinilabade kaldenurga muutmist joonisel 3.4 esitatud plokis tuuleturbiini juhtimissüsteem. Turbiinilabade kaldenurga muutmisel on kolm eesmärki, millest lähtuvalt täiendati selle juhtimissüsteemi. Esimeseks eesmärgiks on reguleerida elektrituuliku aktiivvõimsust vastavalt sätteväärtustele. Teiseks eesmärgiks on, juhul kui muid reguleerimisi ei teostata, tuulekiiruste vahemikus 12...25 m/s piirata tuuliku aktiivvõimsus 5 MW-ga. Kolmandaks eesmärgiks on tuuleelektrijaama välja lülitamisel või tuulekiirustel üle 25 m/s viia tuuliku aktiivvõimsus nulli.

3.5 Päikeseelektrijaama mudel

Päikeseelektrijaama modelleeriti ühe ekvivalentse päikesepaneeliga, mille mudel ja juhtimissüsteem saadi RSCAD-i näitemudelitest. Päikeseelektrijaama nimiaktiivvõimsus on 5 MW temperatuuril 25° C ja päikesekiirgusel 1000 W/m². Eeldati, et suurema osa aastast ei tööta päikeseelektrijaam maksimaalse aktiivvõimsusega ja seega valiti muunduri nimivõimsuseks 5 MVA. Sarnaselt tuuleelektrijaama mudeliga ei ole ka siin muundurite nimivõimsus otseselt määratav, vaid seda käsitletakse edaspidi piirväärtusena. Päikeseelektrijaama väljundpinge on 0,48 kV ja seega ühendati see elektrivõrguga läbi 6,3/0,48 kV trafo. Päikeseelektrijaama mudel on esitatud joonisel 3.5.

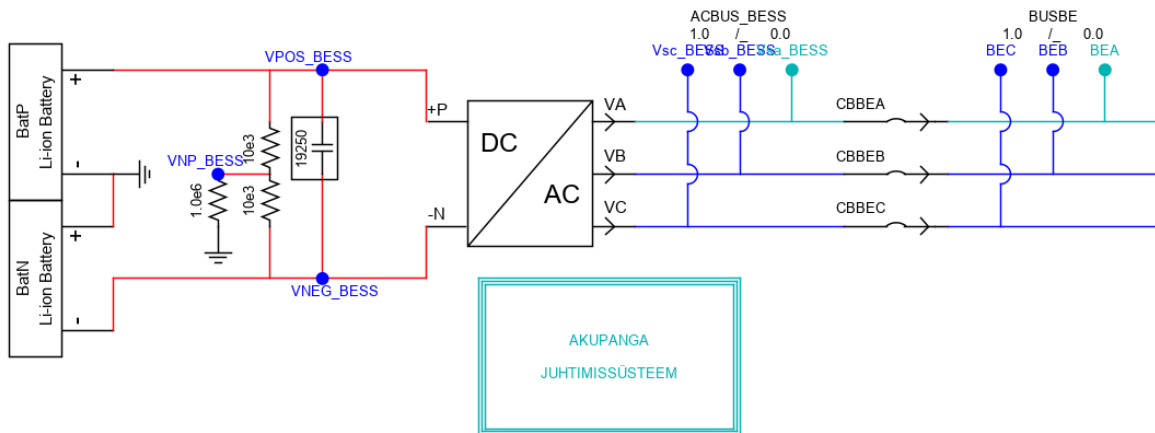


Joonis 3.5 Päikeseelektrijaama mudel

Päikesepaneeli mudeli sisenditeks on päikesekiirgus ja temperatuur (joonisel 3.5 vastavalt *INSOLMEAS* ja *TEMP*), mida on võimalik sujuvlülititega reguleerida, ning väljundiks alalispinge ja maksimaalsele võimsusele vastav pinge (joonisel 3.5 *VMMPT*). Pingemuunduri elektrilist osa modelleeriti DC-AC plokiga, mille sisenditeks on alalispinge ja referentspinge lained. Referentspinge lained on plokis defineeritud muutujatena, mis arvutatakse päikeseelektrijaama juhtimissüsteemis (joonisel 3.5 kollane kast). Maksimaalse võimsuspunkti ja alalispinge alusel arvutatakse maksimaalne aktiivvõimsus, mida päikeseelektrijaam on võimeline tootma. Juhtimissüsteemi lisati ümberlülitid, mille kaudu on võimalik päikeseelektrijaama aktiivvõimsust vastavalt vajadusele reguleerida, arvestades siiski maksimaalse võimaliku võimsusega. Aktiivvõimsuse sätteväärtuse alusel arvutatakse vektorjuhtimissüsteemi d-telje suunaline vooluvektor. Reaktiivvõimsust on võimalik reguleerida manuaalselt ja automaatselt, milleks lisati juhtimissüsteemi vastavad ümberlülitid. Reaktiivvõimsuse sätteväärtuse alusel arvutatakse vektorjuhtimissüsteemi q-telje suunaline vooluvektor. Nimetatud vooluvektorite ja vahelduvvoolusüsteemi poolt mõõdetud pingete ja voolude alusel arvutatakse suhtühikutes moduleerivad pingelained, mis edastatakse muunduri ploki. Muunduri töö sünkroniseerimiseks ülejäänud elektrivõrguga kasutatakse faasilukustit, mille sisenditeks on vahelduvvoolusüsteemi pinged.

3.6 Akupanga mudel

Akupanga mudel ja juhtimissüsteem sarnanevad suurel määral päikeseelektrijaama mudeli ja juhtimissüsteemiga. Akupanga nimivõimsuseks valiti 5 MVA, mis ühtib tuule- ja päikese-elektrijaamade nimivõimsustega. Sarnaselt tuule- ja päikeseelektrijaamaga ei ole ka siin nimivõimsus määratav, vaid seda käsitletakse edasiselt piirväärtustena. Erinevalt tuule- ja päikeseelektrijaamadest, on akupanga puhul oluline selle laetuse tase, mille maksimaalseks ja minimaalseks väärtuseks valiti vastavalt 97 ja 20%. Need väärtused sõltuvad oluliselt akupanga tootja määratud väärtustest ja lõputöös kasutati neid akupanga piirvõimsuste määramisel. Lisaks ei ole lõputöö eesmärgi täitmisel otseselt oluline akude mahutavus. Muunduri väljundpinge on 0,48 kV ja see ühendati elektrivõrguga läbi 6,3/0,48 kV elektrivõrgu. Akupanga mudel on esitatud joonisel 3.6.



Joonis 3.6 Akupanga mudel

Akupanga juhtimissüsteemi ülesehitus ja eesmärk on analoogne päikeseelektrijaama juhtimissüsteemiga. Erinevuseks on siinkohal, et reaktiivvõimsuse kõrval on ka aktiivvõimsus piirväärtuste vahemikus vabalt määratav. Lisaks on akupanga juhtimissüsteemi lisatud võime reguleerida pinget ja sagedust saartalitluse korral. Võrguühenduse korral või generaatoriga saartalitluse korral on aktiiv- ja reaktiivvõimsus vabalt määratavad ning faasilukusti sisenditeks on muunduri vahelduvvoolu poolelt mõõdetud pinged. Sünkroongeneraatorita saartalitluse korral on juhtimissüsteemi sisenditeks pinge ja sageduse sätteväärtused. Saartalitluse korral ei arvestata enam ka aktiiv- ja reaktiivvõimsuse piirväärtustega, vaid need viiakse tasemeni, mis on vajalik pinge ja sageduse säilitamiseks. Kirjeldatud olukorras kasutatakse teisi seadmeid, et vältida akupanga pikaajast tööd väljaspool lubatud piire.

3.7 Võimsuste jaotamise matemaatilised kriteeriumid

Tulenevalt sellest, et tööstusettevõtte elektrivõrku lisati peale olemasoleva sünkroongeneraatori ka uued tootmisüksused, muutub oluliseks võimsuste jaotamine nende vahel. Reaktiivvõimsuse jaotamist mitme sünkroongeneraatori vahel on varasemalt uuritud magistritöös [44], milles kirjeldatud meetodite põhimõtted on rakendatavad ka käesolevas lõputöös aktiiv- ja reaktiivvõimsuse jaotamiseks erinevate tootmisüksuste vahel. Eelnevas lõputöös toodi reaktiivvõimsuse jaotamise meetoditena välja võrdeline, järjestikuline ja proportsionaalne jaotamine ning jaotamine ühendusliinide võimsuskadude järgi ja ühendusliinide võimsuskadude suhteliste juurdekasvude järgi. Käesolevas lõputöös tuuakse välja kolm esimest meetodit nende rakendatavuse tõttu ja kuna eelnevas lõputöös leiti, et see ei põhjusta elektrivõrgus võimsuskadude olulist suurenemist.

Võrdelisel reguleerimisel jaotatakse aktiiv- või reaktiivvõimsus tootmisüksuste vahel nii, et reguleerimise lõpus on kõikide tootmisüksuste aktiiv- või reaktiivvõimsused võrdsed. Aktiivvõimsuse võrdelise reguleerimise lõppseisu kirjeldab avaldis 3.5 lisatingimustel 3.6, 3.7 ja 3.8 ning reaktiivvõimsuse võrdelise reguleerimise lõppseisu avaldis 3.9 lisatingimustel 3.10, 3.11 ja 3.12.

$$P_{iL\ddot{O}PP} = \frac{P_{LP} - P_{LPref} + \sum_{i=1}^n P_{iALG}}{n}, i = 1 \dots n \quad (3.5)$$

$$f_{min} \leq f \leq f_{max} \quad (3.6)$$

$$P_{imin} \leq P_{iL\ddot{O}PP} \leq P_{imax} \quad (3.7)$$

$$P_{LP} = P_K + \Delta P \quad (3.8)$$

$$Q_{iL\ddot{O}PP} = \frac{Q_{LP} - Q_{LPref} + \sum_{i=1}^n Q_{iALG}}{n}, i = 1 \dots n \quad (3.9)$$

$$U_{min} \leq U_j \leq U_{max}, j = 1 \dots m \quad (3.10)$$

$$Q_{imin} \leq Q_{iL\ddot{O}PP} \leq Q_{imax} \quad (3.11)$$

$$Q_{LP} = Q_K + \Delta Q \quad (3.12)$$

- kus $P_{iL\ddot{O}PP}$ – i-nda tootmisüksuse aktiivvõimsus reguleerimise lõpetamisel, MW;
 P_{LP} – liitumispunkti läbiv aktiivvõimsus enne reguleerimise alustamist, MW;
 P_{LPref} – liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse sätteväärtus, MW;
 P_{iALG} – i-nda tootmisüksuse aktiivvõimsus enne reguleerimise alustamist, MW;
 n – töös olevate tootmisüksuste arv;
 f_{min} – minimaalne lubatud elektrivõrgu sagedus, Hz;
 f – elektrivõrgu sageduse mõõteväärtus, Hz;
 f_{max} – maksimaalne lubatud elektrivõrgu sagedus, Hz;
 P_{imin} – i-nda tootmisüksuse minimaalne lubatud aktiivvõimsus, MW;
 P_{imax} – i-nda tootmisüksuse maksimaalne lubatud aktiivvõimsus, MW;
 P_K – elektrivõrgu aktiivkoormus, MW;
 ΔP – aktiivvõimsuskaod elektrivõrgus, MW;
 $Q_{iL\ddot{O}PP}$ – i-nda tootmisüksuse reaktiivvõimsus reguleerimise lõpetamisel, Mvar;
 Q_{LP} – liitumispunkti läbiv reaktiivvõimsus enne reguleerimise alustamist, Mvar;
 Q_{LPref} – liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse sätteväärtus, Mvar;
 Q_{iALG} – i-nda tootmisüksuse reaktiivvõimsus enne reguleerimise alustamist, Mvar;
 U_{min} – minimaalne lubatud pinge, kV;
 U_j – j-nda sõlme pinge, kV;
 U_{max} – maksimaalne lubatud pinge, kV;
 m – sõlmede arv elektrivõrgus;
 Q_{imin} – i-nda tootmisüksuse minimaalne lubatud reaktiivvõimsus, Mvar;

- Q_{imax} – i-nda tootmisüksuse maksimaalne lubatud reaktiivvõimsus, Mvar;
 Q_K – elektrivõrgu reaktiivkoormus, Mvar;
 ΔQ – reaktiivvõimsuskaod elektrivõrgus, Mvar.

Eelnevad avaldised on esitatud liitumispunkti läbivate võimsuste reguleerimise näitel. Saartalitlusel on eesmärgiks reguleerida sagedust ja pinget, kuid see toimub vastavalt aktiiv- ja reaktiivvõimsuse reguleerimise teel ning esitatud avaldised on kasutatavad ka nendel juhtumitel. Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse võrdelised reguleerimised toimuvad sarnaselt ning põhiline erinevus tuleneb lisatingimustest. Aktiivvõimsuse korral peab püsima elektrivõrgu sagedus ja reaktiivvõimsuse puhul kõikide sõlmede pinged lubatud piirides. Võimsuste võrdelise reguleerimise eeliseks on asjaolu, juhul kui ükski tootmisüksus ei saavuta reguleerimise ajal piirväärtusi, et kõikide tootmisüksuste rikked mõjutavad süsteemi talitlust võrdselt. Lisaks mõjutavad muud tegurid võrdelise reguleerimise meetodit vähem kui järjestikulise ja proportsionaalse reguleerimise meetodeid. Meetodi puuduseks on asjaolu, et reguleerimisel ei arvestata tootmisüksuste muutuvkuludega, mistõttu aktiivvõimsuse reguleerimine võrdelisel meetodil ei pruugi anda optimaalsemaid tulemusi.

Järjestikulisel reguleerimisel jaotatakse aktiiv- või reaktiivvõimsus tootmisüksuste vahel järjest. Aktiivvõimsuse järjestikulise reguleerimise lõppseisu kirjeldab avaldis 3.13 lisatingimustel 3.6, 3.7 ja 3.8 ning reaktiivvõimsuse järjestikulise reguleerimise lõppseisu avaldis 3.14 lisatingimustel 3.10, 3.11 ja 3.12.

$$P_i = P_{LP} - P_{LPref} - P_{i-1}, i = 2 \dots n \quad (3.13)$$

$$Q_i = Q_{LP} - Q_{LPref} - Q_{i-1}, i = 2 \dots n \quad (3.14)$$

Liitumispunkti läbiva võimsuse reguleerimise näitel edastatakse reguleeritava võimsuse osa täies mahus esimesele tootmisüksusele. Peale esimese tootmisüksuse piirvõimsuse saavutamist edastatakse reguleeritava võimsuse ja esimese tootmisüksuse piirvõimsuse vahe teisele tootmisüksusele jne. Järjestikulise reguleerimise korral on võimalik valida, mis järjekorras tootmisüksusi koormatakse. Meetod sobib olukordades, kus on kindlalt teada tootmisüksuste kulude juurdekasvud ja seega on tootmisüksuste koormamise järjekord lihtsasti määratletav. Lõputöös on meetod sobilik näiteks liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimiseks. Samas tähendab järjestikune reguleerimine, et tootmisüksused on koormatud ebavõrdselt ehk esimene tootmisüksus töötab piirtingimuste lähedal kui viimase tootmisüksuse koormus võib olla nullilähedane. Sellest tulenevalt mõjutavad tootmisüksuste rikked võrgu talitlust erinevalt. Esimese tootmisüksuse rike toob kaasa suured kõikumised, samas kui viimase tootmisüksuse

riike ei pruugi süsteemi mõjutada. Lisaks ei sobi meetod saartalitlusel pinge reguleerimiseks kuna sellisel juhul toimub kiire sageduse reguleerimine tootmisüksuste aktiivvõimsuste kaudu. See tähendab, et esimese tootmisüksuse reaktiivvõimsuse piirväärtuse saavutamisel mõjutab selle tootmisüksuse aktiivvõimsuse muutus kõikide järgnevate tootmisüksuste reaktiivvõimsusi, mis tekitab pinge võnkumisi kuna tootmisüksuste reguleerimiskiirused on erinevad.

Proportsionaalsel reguleerimisel jaotatakse aktiiv- või reaktiivvõimsus tootmisüksuste vahel tootmisüksuse võimsuse piirväärtuse ja kõikide tootmisüksuste võimsuste summa alusel. Aktiivvõimsuse proportsionaalse reguleerimise lõppseisu kirjeldab avaldis 3.15 lisatingimustel 3.6, 3.7 ja 3.8 ning reaktiivvõimsuse proportsionaalse reguleerimise lõppseisu avaldis 3.16 lisatingimustel 3.10, 3.11 ja 3.12.

$$P_{iL\dot{O}PP} = (P_{LP} - P_{LPref}) \cdot \frac{P_{iLim}}{\sum_{i=1}^n P_{iLim}} + \sum_{i=1}^n P_{iALG} \cdot \frac{P_{iLim}}{\sum_{i=1}^n P_{iLim}}, i = 1 \dots n \quad (3.15)$$

$$Q_{iL\dot{O}PP} = (Q_{LP} - Q_{LPref}) \cdot \frac{Q_{iLim}}{\sum_{i=1}^n Q_{iLim}} + \sum_{i=1}^n Q_{iALG} \cdot \frac{Q_{iLim}}{\sum_{i=1}^n Q_{iLim}}, i = 1 \dots n \quad (3.16)$$

kus P_{iLim} – i-nda tootmisüksuse piiraktiivvõimsus, MW;

Q_{iLim} – i-nda tootmisüksuse piirreaktiivvõimsus, Mvar.

Meetodi rakendamise tulemusel toodab iga tootmisüksus võrdse osa enda võimsuspiiridest, millest tulenevalt saavutavad kõik tootmisüksused enda maksimaalse võimsuse samal hetkel. Meetodi rakendamisel arvutatakse igal ajahetkel kõikide tootmisüksuste piirvõimsused ja nende summa. Arvestades, et koostootmisjaama sünkroongeneraatori tarbitava ja toodetava reaktiivvõimsuse maksimaalsed piirid ei ole võrdsed, erinevad kõikide tootmisüksuste tarbimis- ja tootmissuunaliste reaktiivvõimsuste osakaalud. Meetodi puuduseks on võnkumiste tekitamine kiirete protsesside korral, kui reguleeritakse samaaegselt nii aktiiv- kui ka reaktiivvõimsust, näiteks saartalitluse tekkimisel. Saartalitluse tekkimisel on oluline kõikide tootmisüksuste kiire reguleerimine, et vältida sageduse ja pinge liigset tõusu või langust ja et saavutada stabiilne talitus. Olulisemaks peetakse sageduse kiiret reguleerimist, et vältida näiteks sünkroongeneraatori välja lülitumist, mis raskendaks olukorda veelgi. Sageduse kiire reguleerimine tähendab aga aktiivvõimsuse kiiret reguleerimist, mis mõjutab sama kiiresti ka tootmisüksuste reaktiivvõimsuse piire ja reaktiivvõimsuste osakaale. Võrdelise meetodi korral ei tekita see probleeme hetkeni, kui saavutatakse summaarne reaktiivvõimsus, mis on võrdne kõige madalama reaktiivvõimsuse limiidiga tootmisüksuse piirväärtuse ja töös olevate tootmisüksuste arvu kordse väärtusega.

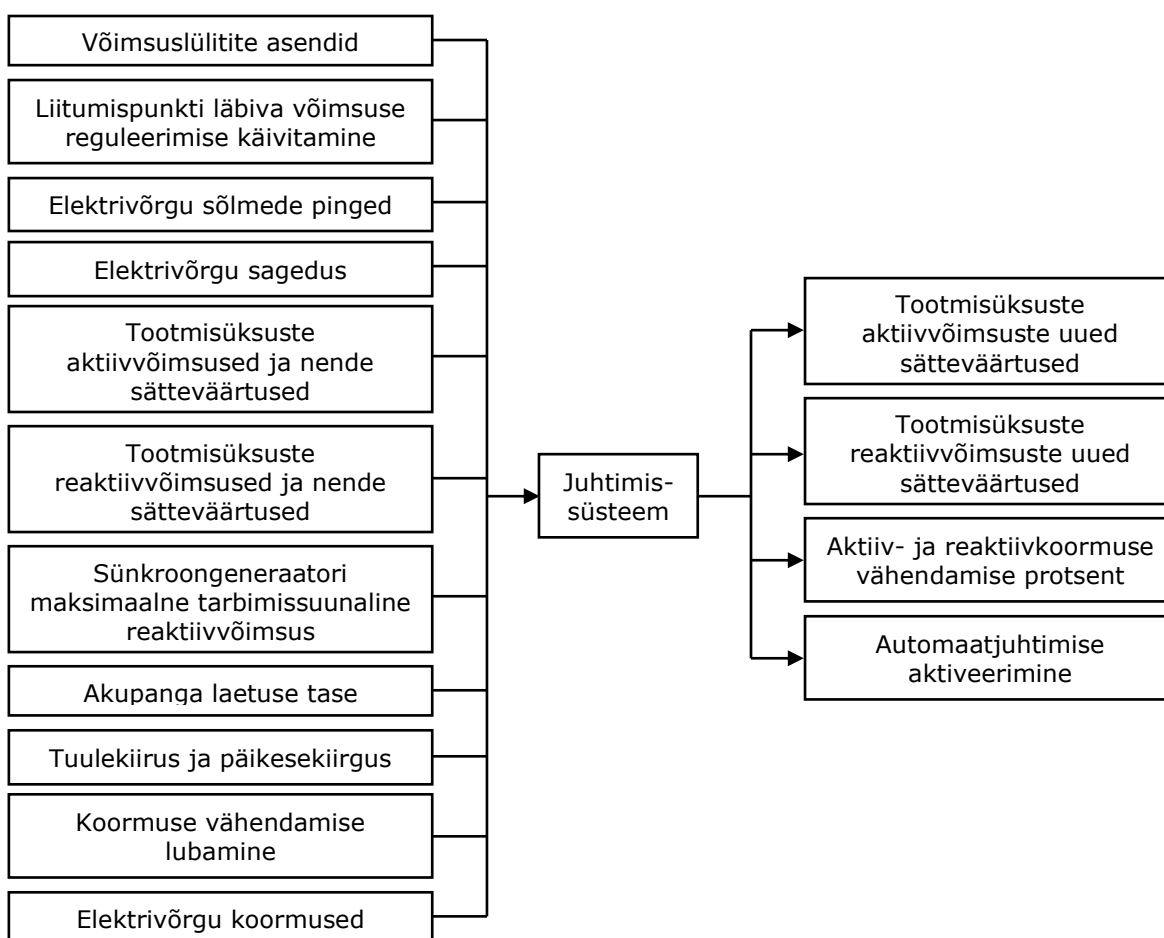
Proportsionaalse reguleerimise korral muutub iga tootmisüksuse reaktiivvõimsuse sätteväärtus sama kiiresti kui on kõige kiirema tootmisüksuse aktiivvõimsuse muutuse kiirus. See viib reaktiivvõimsuste võnkumiseni, mis põhjustavad võimsuskadude võnkumisi ja seega täiendavaid sageduse võnkumisi. Sageduse võnkumine toob omakorda kaasa aktiivvõimsuste sätteväärtuste ümberarvutamise ja aktiivvõimsuse muutused, mis muudab jällegi reaktiivvõimsuste osakaale.

3.8 Juhtalgoritmide ülesehitus reaajasimulaatoril

Juhtalgoritmide koostamisel oli kolm eesmärki: süsteemiteenuste pakkumine, liitumispunkti läbivate võimsuste reguleerimine ja saartalitluse võimaldamine. Lõputöö esimeses osas kirjeldati erinevaid süsteemiteenuseid, millest leiti, et olulisemateks teenusteks on sageduse ehk aktiivvõimsusega ja pingega ehk reaktiivvõimsusega seotud teenused. Muude süsteemiteenuste, näiteks elektrisüsteemi stabiilsuse, elektrikvaliteedi ja võimsusvoogude juhtimise teenuste, kasutamine on riigiti erinev. Seega vaadeldakse süsteemiteenustena järgnevalt ainult sageduse ja pingega seotud süsteemiteenuseid ning tulenevalt nende juhtalgoritmide ülesehituse keerukusest koostatakse need ainult tööstuskontrolleril, mida käsitletakse lõputöö neljandas peatükis. Tööstusettevõtte elektrivõrgu liitumispunkti läbivate võimsusvoogude reguleerimine on oluline paindliku liitumise võimaldamiseks, kuna vaadeldavas liitumispunktis on vähe vabu liitumisvõimsusi. Paindlik liitumine tähendab, et uus liituja võib lisada sõlme rohkem võimsusi kui on vabu liitumisvõimsusi, kuid ülekandevõrgu operaatorile jäetakse võimalus vajaduse korral liituja võimsusi piirata, kui peaks esinema mõne võrguelemendi ülekoormus [4]. Liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse juhtalgoritmide põhjal koostatakse tööstuskontrolleris reaktiivvõimsusega seotud süsteemiteenuste pakkumise juhtalgoritmid. Samuti on liitumispunkti läbivate võimsuste reguleerimissüsteemile tulevikus võimalik üles ehitada täpsem võimsusvoogude reguleerimise süsteemiteenuse juhtimissüsteem. Saartalitluse juhtalgoritmid koostatakse tööstusettevõtte elektrivõrgu varustuskindluse tõstmiseks. Kõrgem varustuskindlus vähendab katkestustest põhjustatud kulusid, mis väljenduvad peamiselt tarbijatele makstud tasudes. Saartalitlust vaadeldakse kahel juhtumil, kui koostootmisjaama sünkroongeneraator on töös ja kui see on väljas. Järgnevalt kirjeldatakse koostatud juhtimissüsteemi abisüsteemide põhimõtteid ja seejärel keskendutakse liitumispunkti läbivate võimsuste ning saartalitluse regulaatorite põhimõtetele ja ülesehitusele reaajasimulaatoris.

3.8.1 Juhtimissüsteemi abisüsteemide põhimõtted

Abisüsteemide all mõeldakse loogikalülitusi ja arvutusi, mis on sisenditeks liitumispunkti läbivate võimsuste ja saartalitluse regulaatoritele. Juhtimissüsteemi koostamisel lähtuti lihtsustusest, et ettevõtte elektrivõrk saab ülekandevõrguga olla ühenduses ainult trafo C2T kaudu. Ühendus läbi trafo C1T muudab sõlme, kus mõõdetakse liitumispunkti läbivaid võimsusi, ja võimsuslüliteid, mille asendite alusel määratakse saartalitluse teke. Reaalajasimulaatoril koostatud juhtimissüsteemi sisenditeks on: võimsuslülite CBT2, CB2, CB7, CB11, CB14, CB17, CB18, CB19, CBTBE, CBBE, CBTWN, CBWN, CBTPV ja CBPV asendid (joonis 3.1), liitumispunkti läbiva võimsuse reguleerimise käivitamine, elektrivõrgu sõlmede pinged, elektrivõrgu sagedus, tootmisüksuste aktiiv- ja reaktiivvõimsused ning nende säteväärtused, sünkroongeneraatori maksimaalne tarbimissuunaline reaktiivvõimsus, akupanga laetuse tase, tuulekiirus, päikesekiirgus, koormuse vähendamise lubamine ja elektrivõrgu koormused. Juhtimissüsteemi väljunditeks on kõikide tootmisüksuste aktiiv- ja reaktiivvõimsuste uued säteväärtused, koormuse vähendamise protsent ja automaatjuhtimise aktiveerimine. Juhtimissüsteemi sisendite ja väljundite plokk skeem on esitatud joonisel 3.7.

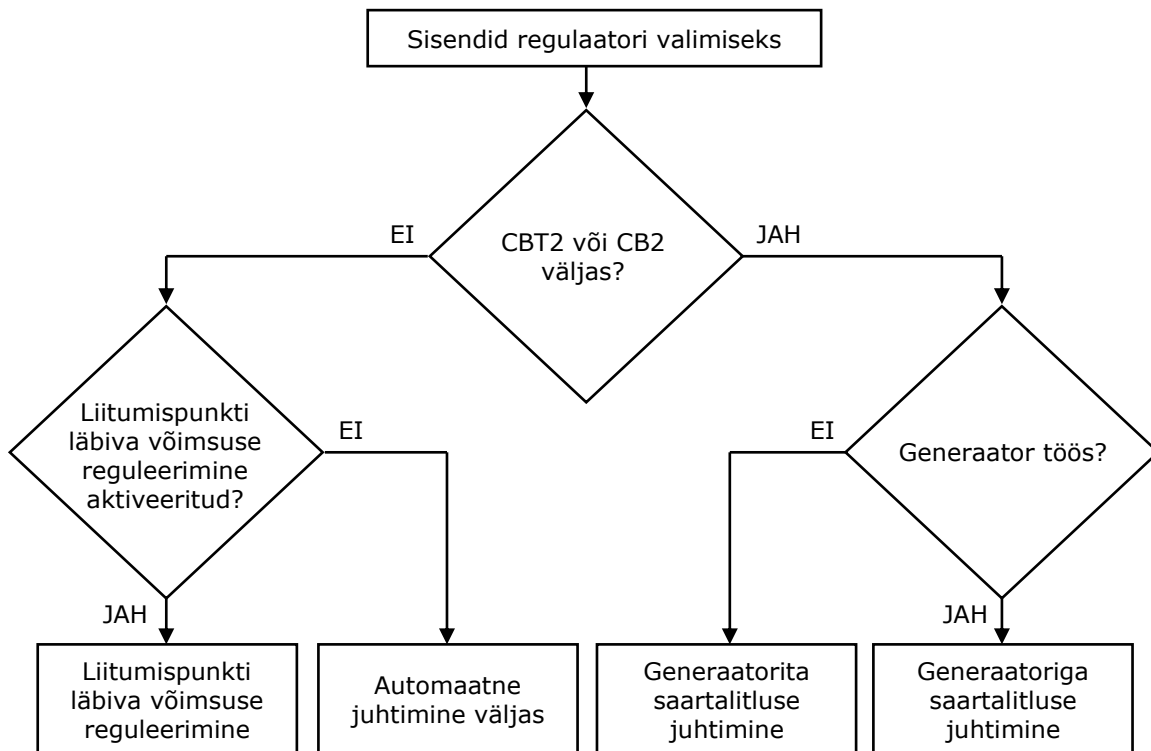


Joonis 3.7 Juhtimissüsteemi sisendite ja väljundite plokk skeem

Võimsuslülitite asendeid kasutatakse esmalt tootmisüksuste töös oleku ja saartalitluse tuvastamiseks. Tootmisüksuste puhul kasutatakse nende töös või väljas oleku määramiseks võimsuslülitite asendeid, kuna võrgukonfiguratsioonide arv, mille puhul loetakse need tööst väljas olevaks, on väike. Näiteks on sünkroongeneraatori puhul tarvis vaadelda ainult lülitite CB7, CB17 ja CB18 asendeid. Need lülitid on jadamisi, mis tähendab, et generaatori tööst väljas oleku tuvastamiseks piisab kui ainult üks eelnevalt nimetatud võimsuslülititest on väljas. Töös olevate tootmisüksuste tuvastamine on oluline kahel eesmärgil, esiteks on see maksimaalsete reguleerimisvõimsuse arvutamise eelduseks ja teiseks määratakse generaatori töös ja väljas oleku alusel saartalitluse liik.

Reaalajasimulaatoris koostatud juhtimissüsteem sisaldab nelja regulaatorite kogumit: liitumispunkti läbiva aktiiv- ja reaktiivvõimsuse, generaatoriga saartalitluse ning generaatorita saartalitluse regulaatoreid. Õigete regulaatorite valikuks on olulised võimsuslülitite CBT2 ja CB2 asendid, liitumispunkti läbiva võimsuse reguleerimise aktiveeritus ja sünkroongeneraatori töös olek. Liitumispunkti läbiva aktiiv- või reaktiivvõimsuse reguleerimist saab valida eraldi. Saartalitluse regulaatorid käivitatakse automaatselt kui tuvastatakse kas võimsuslülitit CBT2 või CB2 avatud olek. Järgnevalt kontrollitakse kas sünkroongeneraator on töös või väljas. Juhul kui generaator on töös toimivad generaatoriga saartalitluse regulaatorid ja juhul kui generaator on väljas toimivad generaatorita saartalitluse regulaatorid. Saartalitluse teke lõpetab ka liitumispunkti läbiva võimsuse regulaatorite tööd. Lisaks on kõikide tootmisüksuste aktiiv- ja reaktiivvõimsuste sätteväärtuste sisendites ümberlülitid, millega valitakse õige regulaatori väljund. Õige regulaatori valimist kirjeldab joonisel 3.8 esitatud plokk skeem.

Elektrivõrgu sõlmede pingeid kasutatakse võrku ühendatud koormuste ning minimaalse ja maksimaalse pinget tuvastamiseks. Saartalitlusel kasutatakse pinget reguleerimiseks alajaama AJ1 teise sektsiooni pinget. Elektrivõrku ühendatud koormuste tuvastamiseks kasutatakse pingeid kuna võrgukonfiguratsioonide arv, mille puhul koormus on võrku ühendatud, on suur. Seega muudab võimsuslülitite asendite alusel võrku ühendatud koormuste tuvastamine juhtimissüsteemi tarbetult keerukaks. Erisuseks on vana võrguosa koormused S_{AJ2} ja S_{AJ3} (joonis 3.1), mis on alajaamade AJ2 ja AJ3 lattidest eraldatud võimsuslülititega. Nende puhul jälgitakse lisaks vastavate alajaamade lattide pingetele ka võimsuslülitite CB11 ja CB14 asendeid. Võrku ühendatud koormuste tuvastamise ning nende aktiiv- ja reaktiivvõimsuste alusel arvutatakse elektrivõrgu summaarne koormus, mida kasutatakse maksimaalse reguleerimisvõimsuse ja koormuse vähendamise protsendi arvutustes.



Joonis 3.8 Õige regulaatori valimise plokk skeem

Maksimaalsete ja minimaalsete reguleerimisvõimsuste arvutamiseks on oluline tootmisüksuste töös või väljas oleku teave, aku laetuse tase, tuulekiirus, päikesekiirus, kõikide tootmisüksuste aktiiv- ja reaktiivvõimsused ning nende sätteväärtused, generaatori maksimaalne tarbimissuunaline reaktiivvõimsus, koormuse vähendamise lubamine ning aktiiv- ja reaktiivkoormuste summa. Maksimaalse võimsusega kirjeldatakse kui palju on võimalik suurendada tootmisüksuse tootmissuunalist aktiiv- või reaktiivvõimsust ja minimaalse võimsusega kui palju on võimalik vähendada tootmisüksuse tootmissuunalist aktiivvõimsust või suurendada tarbimissuunalist reaktiivvõimsust. Järgnevalt kirjeldatakse esmalt aktiivvõimsuste piirväärtusi ning seejärel reaktiivvõimsuste piirväärtusi.

Akupanga nimivõimsuseks valiti eelnevalt 5 MVA, kuid juhtimissüsteemis piiratakse selle maksimaalne ja minimaalne aktiivvõimsus vastavalt 4 ja -4 MW-ga. Tegu on vastavalt tootmis- ja tarbimissuunaliste aktiivvõimsustega. Sellised aktiivvõimsuse piirid valiti, et akupank saaks alati toota või tarbida ka reaktiivvõimsust. Akupanga maksimaalne ja minimaalne reguleerimisvõimsus tulenevad vastavalt maksimaalse aktiivvõimsuse ja aktiivvõimsuse sätteväärtuse vahest ning minimaalse aktiivvõimsuse ja aktiivvõimsuse sätteväärtuse vahest. Sünkroongeneraatori maksimaalne võimalik aktiivvõimsus sõltub hetkel toodetavast soojusenergiast, mida lõputöös simuleeritakse sujuvlüliti *PREF_GEN* (joonis 3.3) väärtustega. Lisaks on võimalik generaatori aktiivvõimsust manuaalselt alla reguleerida (sujuvlüliti *GEN_DN* joonis 3.3). Sellest tulenevalt on generaatori

maksimaalne reguleerimisvõimsus võrdne maksimaalse võimaliku aktiivvõimsuse ja aktiivvõimsuse sätteväärtuse vahega. Generaatori minimaalne aktiivvõimsus on 0,3 MW, millest lähtuvalt on generaatori minimaalne reguleerimisvõimsus võrdne aktiivvõimsuse sätteväärtuse ja minimaalse võimaliku aktiivvõimsuse vahega. Tuuleelektrijaama maksimaalne võimalik aktiivvõimsus sõltub tuulekiirusest. Sarnaselt sünkroongeneraatoriga on ka tuuleelektrijaama aktiivvõimsust võimalik manuaalselt vähendada. Seega on tuuleelektrijaama maksimaalne reguleerimisvõimsus võrdne maksimaalse võimaliku aktiivvõimsuse ja aktiivvõimsuse sätteväärtuse vahega. Tuuleelektrijaama minimaalne võimalik aktiivvõimsus on 0 MW ja seega on minimaalne reguleerimisvõimsus võrdne tuuleelektrijaama aktiivvõimsuse sätteväärtusega. Päikeseelektrijaama maksimaalsete ja minimaalsete reguleerimisvõimsuste määramine toimub tuuleelektrijaamaga samadel alustel. Akupanga maksimaalset ja minimaalset reguleerimisvõimsust kirjeldavad avaldised 3.17 ja 3.18, sünkroongeneraatori maksimaalset ja minimaalset reguleerimisvõimsust avaldised 3.19 ja 3.20, tuuleelektrijaama maksimaalset ja minimaalset reguleerimisvõimsust avaldised 3.21 ja 3.22 ning päikeseelektrijaama maksimaalset ja minimaalset reguleerimisvõimsust avaldised 3.23 ja 3.24.

$$P_{maxregBE} = 4 - P_{säteBE} \quad (3.17)$$

$$P_{minregBE} = -4 - P_{säteBE} \quad (3.18)$$

$$P_{maxregGEN} = P_{maxGEN} - P_{säteGEN} \quad (3.19)$$

$$P_{minregGEN} = P_{säteGEN} - 0,3 \quad (3.20)$$

$$P_{maxregWN} = P_{maxWN} - P_{säteWN} \quad (3.21)$$

$$P_{minregWN} = P_{säteWN} \quad (3.22)$$

$$P_{maxregPV} = P_{maxPV} - P_{sätePV} \quad (3.23)$$

$$P_{minregPV} = P_{sätePV} \quad (3.24)$$

- kus $P_{maxregBE}$ – akupanga maksimaalne reguleerimisvõimsus, MW;
 $P_{säteBE}$ – akupanga aktiivvõimsuse sätteväärtus, MW;
 $P_{minregBE}$ – akupanga minimaalne reguleerimisvõimsus, MW;
 $P_{maxregGEN}$ – sünkroongeneraatori maksimaalne reguleerimisvõimsus, MW;
 P_{maxGEN} – sünkroongeneraatori maksimaalne võimalik aktiivvõimsus, MW;
 $P_{säteGEN}$ – sünkroongeneraatori aktiivvõimsuse sätteväärtus, MW;
 $P_{minregGEN}$ – sünkroongeneraatori minimaalne reguleerimisvõimsus, MW;
 $P_{maxregWN}$ – tuuleelektrijaama maksimaalne reguleerimisvõimsus, MW;
 P_{maxWN} – tuuleelektrijaama maksimaalne võimalik aktiivvõimsus, MW;
 $P_{säteWN}$ – tuuleelektrijaama aktiivvõimsuse sätteväärtus, MW;
 $P_{minregWN}$ – tuuleelektrijaama minimaalne reguleerimisvõimsus, MW;

$P_{maxregPV}$ – päikeseelektrijaama maksimaalne reguleerimisvõimsus, MW;

P_{maxPV} – päikeseelektrijaama maksimaalne võimalik aktiivvõimsus, MW;

$P_{sätePV}$ – päikeseelektrijaama aktiivvõimsuse sätteväärtus, MW;

$P_{minregPV}$ – päikeseelektrijaama minimaalne reguleerimisvõimsus, MW.

Lisaks arvestati tootmisüksuste reguleerimisvõimsuste määramisel, kas vastav tootmisüksus on sees või väljas. Juhul kui tootmisüksus on väljas, määratakse selle reguleerimisvõimsuseks 0 MW. Akupanga puhul arvestati lisaks laetuse tasemega. Juhul kui see on üle 97%, määratakse akupanga minimaalseks reguleerimisvõimsuseks 0 MW ehk akupank ei saa rohkem aktiivvõimsust tarbida. Juhul kui see on alla 20% määratakse akupanga maksimaalseks reguleerimisvõimsuseks 0 MW ehk akupank ei saa rohkem aktiivvõimsust toota. Lõputöös ei ole akupanga laetuse tase otseselt oluline ja see lisati juhtimissüsteemi eesmärgiga, kui tööstuskontrollerit kasutatakse reaalses elektrivõrgus. Koormuse maksimaalne reguleerimisvõimsus on võrdne aktiivkoormuste summaga ja minimaalne reguleerimisvõimsus 0 MW.

Akupanga ning tuule- ja päikeseelektrijaama maksimaalne ja minimaalne võimalik reaktiivvõimsus sõltuvad nende niminäivvõimsustest ja hetkel toodetavast aktiivvõimsusest. Lõputöös eeldati, et vahelduv- ja alalisvoolusüsteemide pinged ei piira reaktiivvõimsust. Generaatori maksimaalne võimalik reaktiivvõimsus määratakse selle hetkel toodetava aktiivvõimsuse alusel. Selleks teostati katsed, kus generaatori aktiivvõimsust tõsteti järk-järgult vahemikus 0...0,78 s.ü 0,1 s.ü astmetega. Igal aktiivvõimsuse astmel leiti reaktiivvõimsus, mille puhul ergutusvoolu väärtus oli väiksem, kuid lähedane üleergutuspiiraja rakendumisväärtusele. Generaatori minimaalne võimalik reaktiivvõimsus saadakse alaergutuspiirajast. Tootmisüksuste maksimaalsed ja minimaalsed reguleerimisvõimsused olenevad sellest, millist reguleerimisviisi kasutatakse. Võrdelise ja proportsionaalse reguleerimisviisi korral on maksimaalne ja minimaalne reguleerimisvõimsus võrdsed vastava tootmisüksuse maksimaalse ja minimaalse võimaliku reaktiivvõimsusega. Järjestikuse reguleerimise korral on tootmisüksuste maksimaalsed ja minimaalsed reguleerimisvõimsused võrdsed maksimaalse või minimaalse võimaliku reaktiivvõimsuse ning reaktiivvõimsuse sätteväärtuse vahega. Akupanga maksimaalset ja minimaalset reguleerimisvõimsust võrdelisel ja proportsionaalsel reguleerimisel kirjeldavad avaldised 3.25 ja 3.26 ning järjestikulisel reguleerimisel avaldised 3.27 ja 3.28. Sünkroongeneraatori maksimaalset ja minimaalset reguleerimisvõimsust võrdelisel ja järjestikulisel reguleerimisel kirjeldavad avaldised 3.29 ja 3.30 ning järjestikulisel reguleerimisel avaldised 3.31 ja 3.32. Tuule- ja päikeseelektrijaama maksimaalsete reguleerimisvõimsuste arvutamine toimub analoogselt akupangaga ja neid eraldi välja ei tooda.

$$Q_{maxreg1BE} = \sqrt{S_{nBE}^2 - P_{hetkBE}^2} \quad (3.25)$$

$$Q_{minreg1BE} = -Q_{maxreg1BE} \quad (3.26)$$

$$Q_{maxreg2BE} = \sqrt{S_{nBE}^2 - P_{hetkBE}^2} - Q_{säteBE} \quad (3.27)$$

$$Q_{minreg2BE} = -Q_{maxreg2BE} \quad (3.28)$$

$$Q_{maxreg1GEN} = Q_{maxGEN} \quad (3.29)$$

$$Q_{minreg1GEN} = Q_{minGEN} \quad (3.30)$$

$$Q_{maxreg2GEN} = Q_{maxGEN} - Q_{säteGEN} \quad (3.31)$$

$$Q_{minreg2GEN} = Q_{minGEN} - Q_{säteGEN} \quad (3.32)$$

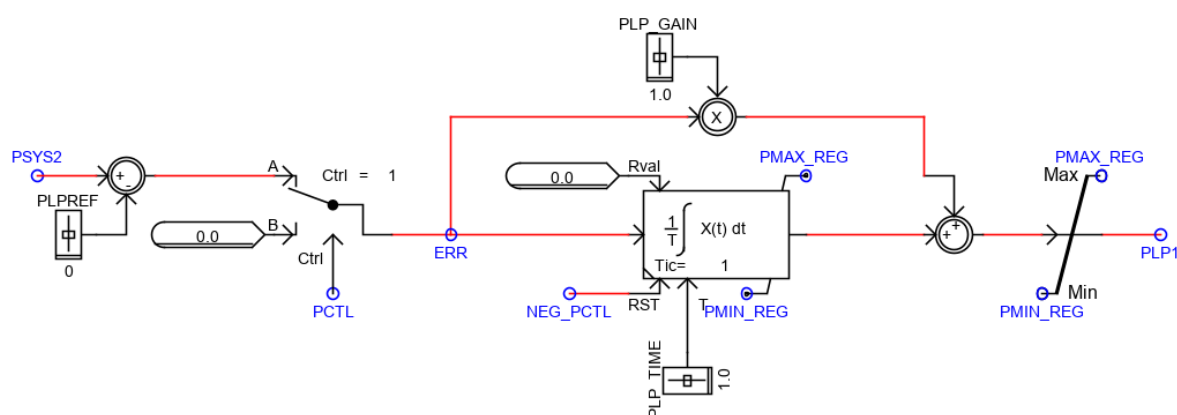
- kus $Q_{maxreg1BE}$ – akupanga maksimaalne reguleerimisvõimsus võrdelisel või proportsionaalsel reguleerimisel, Mvar;
- S_{nBE} – akupanga niminäivvõimsus, MVA;
- P_{hetkBE} – akupanga hetkel toodetav aktiivvõimsus, MW;
- $Q_{minreg1BE}$ – akupanga minimaalne reguleerimisvõimsus võrdelisel või proportsionaalsel reguleerimisel, Mvar;
- $Q_{maxreg2BE}$ – akupanga maksimaalne reguleerimisvõimsus järjestikulisel reguleerimisel, Mvar;
- $Q_{säteBE}$ – akupanga reaktiivvõimsuse sätteväärtus, Mvar;
- $Q_{minreg2BE}$ – akupanga minimaalne reguleerimisvõimsus järjestikulisel reguleerimisel, Mvar;
- $Q_{maxreg1GEN}$ – sünkroongeneraatori maksimaalne reguleerimisvõimsus võrdelisel või proportsionaalsel reguleerimisel, Mvar;
- Q_{maxGEN} – sünkroongeneraatori maksimaalne võimalik reaktiivvõimsus, Mvar;
- $Q_{minreg1GEN}$ – sünkroongeneraatori minimaalne reguleerimisvõimsus võrdelisel või proportsionaalsel reguleerimisel, Mvar;
- Q_{minGEN} – sünkroongeneraatori minimaalne võimalik reaktiivvõimsus, Mvar;
- $Q_{maxreg2GEN}$ – sünkroongeneraatori maksimaalne reguleerimisvõimsus järjestikulisel reguleerimisel, Mvar;
- $Q_{säteGEN}$ – sünkroongeneraatori reaktiivvõimsuse sätteväärtus, Mvar;
- $Q_{minreg2GEN}$ – sünkroongeneraatori minimaalne reguleerimisvõimsus järjestikulisel reguleerimisel, Mvar.

Eelneva põhjal arvutatakse igal hetkel summaarsed maksimaalsed ja minimaalsed reguleerimisvõimsused. Lisaks arvutatakse iga tootmisüksuse maksimaalse ja minimaalse võimaliku reaktiivvõimsuse ning maksimaalse ja minimaalse summaarse võimaliku reaktiivvõimsuse alusel osakaalud reaktiivvõimsuse proportsionaalseks

reguleerimiseks. Osakaalude arvutamisel ei ole maksimaalses või minimaalses võimalikus reaktiivvõimsuses sees reaktiivkoormust.

3.8.2 Liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimine

Liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimine käivitatakse manuaalselt ja seda saab teostada eraldi liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse reguleerimisest. Liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimiseks koostati reaalajasimulaatoris PI regulaator, mis koos sisendite ja väljunditega on esitatud joonisel 3.9.



Joonis 3.9 Liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimiseks koostatud PI regulaator

Regulaatori sisenditeks on liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse mõõteväärtuse *PSYS2* ja sätteväärtuse *PLPREF* vahe. Lisaks on regulaatori ees ümberlülitit, mida juhitakse signaaliga *PCTL*. Kui liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimine on käivitatud ja samal ajal ei ole saartalitlust tuvastatud, on signaali *PCTL* väärtus 1 ning valitakse ülemine sisend ehk mõõte- ja sätteväärtuse vahe. Vastasel juhul on signaali *PCTL* väärtus 0 ja regulaatori sisendiks on 0. Regulaator koosneb kahest harust, ülemisest ehk proportsionaalse ja alumisest ehk integraalse regulaatori harust, mille väljundid liidetakse ning väljastatakse muutujana *PLP1*. Nimetatud muutuja jagatakse tootmisüksuste vahel vastavalt valitud reguleerimisviisile, mida kirjeldati lõputöö jaotises 3.7.

Proportsionaalseid (P), integraalseid (I) ja derivatiivseid (D) regulaatoreid ning nende kombinatsioone on kirjeldatud allikas [45]. Regulaatori eesmärgiks on selle sisend ehk juhtimisviga viia nulli. Proportsionaalses lülis korrutatakse regulaatori sisend võimendusteguriga (joonisel 3.9 *PLP_GAIN*). Ainult proportsionaalse reguleerimisega saavutatakse tasakaalupunkt ehk alles jääb teatud jääkviga ja juhtimisviga ei ole võimalik nulli viia. Jääkvea kõrvaldamiseks on võimalik kasutada integraalset

regulaatorit. Integraalses regulaatoris integreeritakse juhtimisviga määratud ajakonstandi vältel (joonisel 3.9 *PLP_TIME*), millega võimendatakse regulaatori väljundit. Juhtimisvea väärtuse null saavutamisel jääb integraalse regulaatori väljund konstantseks. PI regulaatori täiendamiseks on võimalik kasutada diferentseerivat regulaatorit. Selle väljund sõltub juhtimisvea muutumise kiirusest. Samas on PID regulaatori häälestamine tunduvat keerulisem kui PI regulaatorite häälestamine ja seega lõputöös neid ei kasutatud.

Joonisel 3.9 esitatud regulaatori õigeks tööks on veel vajalikud muutujad *NEG_PCTL*, *PMAX_REG* ja *PMIN_REG*. Muutuja *NEG_PCTL* on muutuja *PCTL* vastand ehk kui *PCTL* väärtus on null, siis *NEG_PCTL* väärtus on üks ja vastupidi. Muutujat *NEG_PCTL* kasutatakse integraalse regulaatori väljundi nullimiseks, mis on oluline kui reguleerimine lülitatakse välja ja seejärel tagasi sisse. Reguleerimise välja lülitamisel, määratakse regulaatori sisendiks 0 ehk integraalse regulaatori väljund jääb konstantseks. See tähendab, et reguleerimise uuesti käivitamisel on regulaatori väljundis mingi väärtus, mis tekitab hüppe reguleerimise alghetkel. Muutujad *PMIN_REG* ja *PMAX_REG* tähistavad vastavalt summaarset minimaalset ja maksimaalset reguleerimisvõimsust, mille arvutamist kirjeldati lõputöö jaotises 3.8.1. Nimetatud muutujad piiravad regulaatori väljundit ehk piiri saavutamisel edasist reguleerimist ei toimu kuna vabu reguleerimisvõimsusi ei ole. Lisaks on joonisel 3.9 näha, et piirväärtusi kasutatakse kahes kohas, regulaatori väljundis ja integraalse regulaatori sees. Neist esimene piirab terve regulaatori väljundit ja teine peatab juhtimisvea integreerimise.

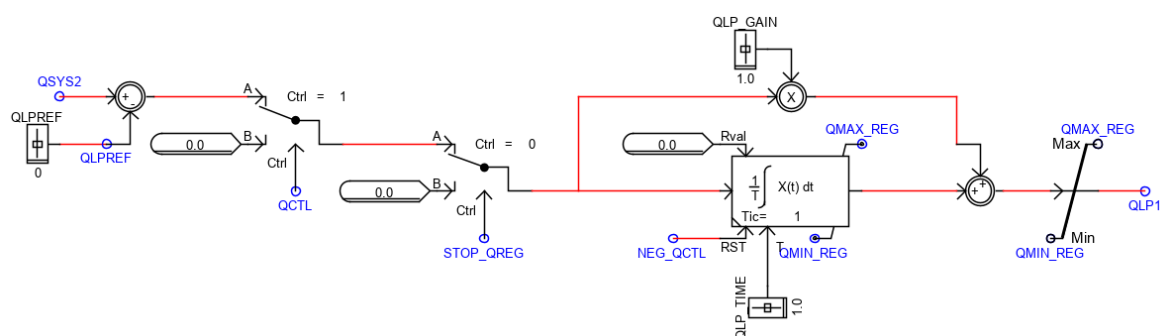
Liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimisel kasutatakse ainult järjestikulise reguleerimise meetodikat, sest aktiivvõimsuse suurendamise või vähendamisega kaasnevad kulude muutused on lihtsasti määratletavad. Reguleerimise saab jaotada kaheks olenevalt sellest, kas tootmisüksuste aktiivvõimsusi on vaja suurendada või vähendada. Reguleerimise järjekord määrati põhiliselt muutuvkulude alusel. Allikas [22] on esitatud, et maismaal asuvate tuuleelektrijaamade muutuvkulud on 2030. aastal 1,35 EUR/MWh ja puiduhaket kütusena kasutavate koostootmisjaamade muutuvkulud 2030. aastal 9,2 EUR/MWh_{el}. Päikeseelektrijaamade muutuvkulude kohta ei ole nimetatud allikas infot esitatud. Lõputöös eeldati, et need on madalamad kui tuuleelektrijaamadel kuna päikeseelektrijaamades puuduvad liikuvad osad. Tuuleelektrijaamade puhul arvestati, et nende reguleerimisel liigutatakse tuuleturbiini labasid, mis põhjustab mehaaniliste osade kulumist ja seega suurendab hoolduskulusid. Liitiumioon akudel põhinevate akupankade muutuvkulud 2030. aastal on 1,8 EUR/MWh [36]. Lisaks arvestati nende laadimis-tühjenemistsükli maksimaalse arvuga, milleks

2030. aastal on 30000 tsüklit [36], mis võib pideval reguleerimisel nende eluiga märgatavalt lühendada. Eelnevast lähtuvalt tõstetakse esimesena päikeseelektrijaama, teisena tuuleelektrijaama, kolmandana sünkroongeneraatori ja neljandana akupanga aktiivvõimsust. Viimasena vähendatakse aktiivkoormust. Akupank jäeti tootmisüksustest viimaseks, et see oleks saartaliluse tekkel piisavalt laetud ning võimeline sagedust ja pinget toetama, sest tegu on kõige kiiremini reguleeritava tootmisüksusega. Siinkohal tuleb arvestada, et päikese- ja tuuleelektrijaama ning sünkroongeneraatori aktiivvõimsused peavad selle tõstmisel olema eelnevalt alla reguleeritud.

Aktiivvõimsuse tootmise vähendamisel reguleeritakse esimesena koostootmisjaama sünkroongeneraatori, teisena päikeseelektrijaama, kolmandana tuuleelektrijaama ja viimasena akupanga aktiivvõimsust. Päikeseelektrijaama aktiivvõimsust vähendatakse enne tuuleelektrijaama aktiivvõimsuse vähendamist, sest tuuleelektrijaama pidev reguleerimine suurendab selle hooldusvajadust ja põhjustab lisakulusid. Aktiivkoormuse tõstmine on võimalik juhul kui seda on eelnevate reguleerimiste käigus vähendatud.

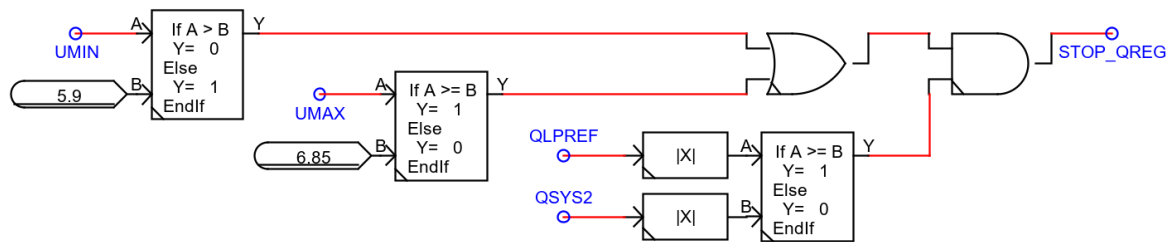
3.8.3 Liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse reguleerimine

Sarnaselt eelnevaga, käivitatakse liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse reguleerimine manuaalselt. Liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse reguleerimiseks koostatud regulaator on esitatud joonisel 3.10.



Joonis 3.10 Liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse reguleerimiseks koostatud regulaator

Joonisel 3.10 esitatud regulaatori põhiline erinevus joonisel 3.9 esitatud regulaatorist seisneb ümberlülitis, mida juhitakse signaaliga *STOP_QREG*. Selle eesmärgiks on reaktiivvõimsuse reguleerimise peatamine, kui mõne sõlme pinge tõuseb liiga kõrgele või langeb liiga madalale. Reguleerimise peatamiseks koostatud loogikalülitus on esitatud joonisel 3.11.



Joonis 3.11 Liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse reguleerimise peatamiseks koostatud loogikalülitus

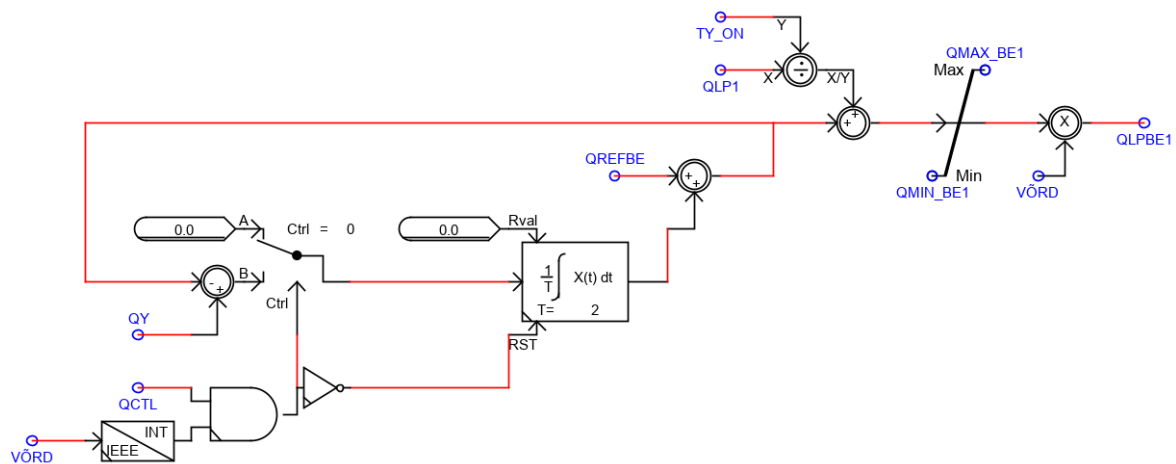
Joonisel 3.11 on võrgus esinev minimaalne ja maksimaalne pinge tähistatud vastavalt signaalidega *UMIN* ja *UMAX* ning liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse mõõte- ja sätteväärtus vastavalt signaalidega *QSYS2* ja *QLPREF*. Kui reguleerimise ajal saavutatakse pinge ülemine või alumine piir ja reguleerimise eesmärk ei ole samal ajal täidetud on joonisel 3.11 esitatud loogikalülituse väljundmuutuja *STOP_QREG* väärtus 1 ja reguleerimine peatatakse ehk joonisel 3.10 esitatud regulaatori sisendiks määratakse 0. Regulaatorit siin ei nullita, vaid jäädakse hoidma konstantset väärtust.

Järgnevalt vaadeldakse esimesena järjestikulist reguleerimisviisi. Reguleerimise järjekord määrati vastavalt sellele, millises järjekorras vähendatakse tootmisüksuste aktiivvõimsust ehk millise tootmisüksuse reaktiivvõimsuse reguleerimisulatus on kõige suurem. Sellest tulenevalt reguleeritakse esimesena koostootmisjaama sünkroongeneraatori, teisena päikeseelektrijaama, kolmandana tuuleelektrijaama ja neljandana akupanga reaktiivvõimsust. Viimasena vähendatakse reaktiivkoormust, kui on vaja vähendada ülekandevõrgust tööstusettevõtte elektrivõrku sisenevat reaktiivvõimsust või suurendada vastupidist reaktiivvõimsuse suunda.

Võrdelisel ja proportsionaalsel reguleerimisel mõjutavad reguleerimist olulisel määral tootmisüksuste reaktiivvõimsuste sätteväärtused ehk see kui palju tootmisüksus enne reguleerimist reaktiivvõimsust tootis või tarbis, sest reguleerimise lõpuks peavad tootmisüksused olema koormatud kas võrdselt või proportsionaalselt. Selleks, et reaktiivvõimsuse reguleerimise lõppseis oleks esimese reguleerimisega võrdne või proportsionaalne koostati iga tootmisüksuse jaoks eraldi juhtahel, mis on võrdelise reguleerimise ja akupanga näitel esitatud joonisel 3.12.

Joonisel 3.12 esitatud juhtahela sisend *QLP1* tähistab joonisel 3.10 esitatud regulaatori väljundit, mis jagatakse töös olevate tootmisüksuste arvuga *TY_ON*. Muutujad *QMAX_BE1* ja *QMIN_BE1* tähistavad akupanga minimaalset ja maksimaalset võimalikku reaktiivvõimsust (avaldised 3.25 ja 3.26). Muutuja *VÕRD* väärtus on 1 või 0, vastavalt sellele, kas võrdeline reguleerimisviis on valitud või mitte. Muutuja *QLPBE1* on akupanga reaktiivvõimsuse uus sätteväärtus. Ülejäänud juhtahela eesmärgiks on viia

tootmisüksuste reaktiivvõimsused, mida need tootsid või tarbisid enne reguleerimise alustamist, võrdseks. Joonisel on akupanga reaktiivvõimsuse sätteväärtus tähistatud muutujaga $QREFBE$ ja tootmisüksuste vahel võrdselt jaotatud reaktiivvõimsus muutujaga QY . Reguleerimise algushetke sujuvuseks alustatakse võrdsustamist kui reaktiivvõimsuse reguleerimine käivitatakse ja valitud on võrdeline reguleerimisviis.



Joonis 3.12 Koostatud juhtahel reaktiivvõimsuse reguleerimise võrdse lõppseisu saavutamiseks akupanga näitel

3.8.4 Sünkroongeneraatoriga saartalitlus

Saartalitluse tekke tuvastamiseks jälgitakse võimsuslülitite CBT2 ja CB2 asendeid. Kui üks või mõlemad neist on väljas, on tegu saartalitlusega ja juhul kui sünkroongeneraator on töös, on tegu generaatoriga saartalitlusega. Saartalitluse juhtimiseks on kaks PI regulaatorit, mille ülesehitused on analoogsed joonisel 3.8 esitatuga. Esimese ülesandeks on tagada õige sagedus ning sellega reguleeritakse tootmisüksuste aktiivvõimsusi ja aktiivkoormust. Regulaatori sisenditeks on alajaama AJ1 (joonis 3.1) teise sektsiooni pinge alusel mõõdetud sagedus ning selle sätteväärtus. Teise regulaatori ülesandeks on tagada õige pinge alajaama AJ1 teise sektsiooni lattidel ning sellega reguleeritakse tootmisüksuste reaktiivvõimsusi ja reaktiivkoormust. Erinevalt eelnevatest regulaatoritest lahutatakse siin sätteväärtustest mõõteväärtused.

Aktiivvõimsuse reguleerimine toimub järjestikuliselt, kuid võrreldes liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimisega on tootmisüksuste järjekord erinev. Saartalitluse tekkel on eesmärgiks reguleerimise kiirus ja seega valiti tootmisüksuste järjekord nende reguleerimiskiiruste alusel. Esimesena reguleeritakse akupanga, teisena päikeseelektrijaama, kolmandana tuuleelektrijaama ja neljandana sünkroongeneraatori aktiivvõimsust. Viimasena kasutatakse vajadusel aktiivkoormuse vähendamist.

Reaktiivvõimsuse reguleerimine toimub saartalitlusel võrdelise meetodi alusel. Ka see regulaator seadistati võimalikult kiireks, kuid siiski aeglasemaks kui sageduse regulaator ehk sageduse hoidmist eelistati pinge hoidmisele. Proportsionaalset meetodit ei kasutatud, sest aktiivvõimsuse kiire muutumise korral, muutuvad kiiresti ka tootmisüksuste reaktiivvõimsuste osakaalud, mis põhjustab liigseid võnkumisi ja pikendab siirdeprotsessi aega. Ka järjestikuline reguleerimine ei ole eelistatud kuna esimese tootmisüksuse reaktiivvõimsuse piiri saavutamisel mõjutavad selle edasised muutused kõikide järgnevate tootmisüksuste reaktiivvõimsusi. Lisaks mõjutavad tootmisüksuste rikked saartalitlust võrdelise reguleerimisviisi korral võrdselt.

3.8.5 Sünkroongeneraatorita saartalitlus

Sünkroongeneraatorita saartalitluse tekke tuvastamiseks kontrollitakse peale saartalitluse teket generaatori töös olekut. Sellises olukorras kasutatakse akupanka, mille juhtimissüsteemi oli lisatud vastav võime, pinge ja sageduse esmaseks reguleerimiseks. Seega ei ole generaatorita saartalitluse juhtimisel regulaatorite eesmärgiks otseselt sageduse ja pinge reguleerimine, vaid akupanga töö toetamine tuule- ja päikeseelektrijaama ning koormuste reguleerimisega.

Eesmärgi täitmiseks kasutati nelja regulaatorit. Esimese regulaatori eesmärgiks on vältida akupanga tootmissuunalise aktiivvõimsuse pikaajalist tõusu üle 4 MW, milleks suurendatakse esimesena päikeseelektrijaama ja teisena tuuleelektrijaama aktiivvõimsust. Viimasena vähendatakse aktiivkoormust. Teise regulaatori eesmärgiks on vältida akupanga tarbimissuunalise aktiivvõimsuse pikaajalist tõusu üle 4 MW, milleks vähendatakse esimesena päikeseelektrijaama ja teisena tuuleelektrijaama aktiivvõimsust. Aktiivkoormust ei suurendata, väljaarvatud juhul kui seda on eelnevate reguleerimiste käigus vähendatud. Kolmanda regulaatori eesmärgiks on vältida akupanga tootmissuunalise reaktiivvõimsuse pikaajalist tõusu üle 3 Mvar, milleks suurendatakse võrdselt päikese- ja tuuleelektrijaama tootmissuunalisi reaktiivvõimsusi ning seejärel vähendatakse reaktiivkoormust. Neljanda integraalse regulaatori eesmärgiks on vältida akupanga tarbimissuunalise reaktiivvõimsuse pikaajalist tõusu üle 3 Mvar, selleks suurendatakse võrdselt päikese- ja tuuleelektrijaama tarbimissuunalisi reaktiivvõimsusi. Kirjeldatud akupanga aktiiv- ja reaktiivvõimsuste piirid valiti, et akupank oleks alati võimeline aktiiv- ja reaktiivvõimsust reguleerima ning seejuures ei ületataks akupanga niminäivvõimsust 5 MVA.

4. JUHTALGORITMIDE ÜLESEHITUSE KIRJELDUS TÖÖSTUSKONTROLLERIL

Lõputöö kolmandas peatükis koostati juhtalgoritmid liitumispunkti läbivate võimsuste reguleerimiseks ja saartalitluse juhtimiseks. Reaalajasimulaatori juhtalgoritmide rakendamine tähendab siiski, et need töötavad ideaalsetes tingimustes, mis ei võta arvesse erinevaid riist- ja tarkvaralisi piiranguid. Riistvaraliseks piiranguks võib olla kontrolleri mõõtesisendite või väljundsignaalide arv. Tarkvaraliseks piiranguks on näiteks kontrolleri koostatud juhtalgoritmide toimeaeg või sideviited juhitava seadme ja kontrolleri vahel. Käesolevas peatükis kirjeldatakse esmalt tööstuskontrollerit ning reaalajasimulaatori ja kontrolleri andmevahetust. Seejärel tuuakse välja eelnevalt koostatud juhtalgoritmide ülesehitus tööstuskontrolleril ja selgitatakse tehtud täiendusi, millega on võimalik pakkuda sageduse ja pingega seotud süsteemiteenuseid.

4.1 Tööstuskontroller NI CompactRIO 9045

National Instrumentsi CompactRIO ehk cRIO tööstuskontrollerid [46] võimaldavad tööstusprotsesse reaalajas jälgida ja juhtida. Need hõlmavad nii riistvara kui ka spetsiaalselt väljatöötatud programmeerimistarkvara LabVIEW. CompactRIO tööstuskontrollerid koosnevad kontrolleri kerest, kontrollerist ning sisend- ja väljundmoodulitest. Kontrolleri mudeli valikust tulenevad kontrolleri laienduspesade arv, programmeerimisviis, protsessor, FPGA moodul, salvestusmaht, muutmälu ja ühenduspordid. CompactRIO kontrolleritel on kas 4 või 8 laienduspesa, kuhu on võimalik ühendada erinevaid sisend- ja väljundmoduleid, näiteks digitaalsisendite ja -väljundite moduleid, pingemoduleid, voolumoduleid, temperatuuri moduleid jm. Sellest tulenevalt on CompactRIO tööstuskontrollerite kasutusala lai. Kontrollerit on võimalik programmeerida programmeerimiskeeltega LabVIEW, C ja C++, mille valik sõltub kasutaja eelistustest ja projekti eesmärkidest. Kontroller põhineb NI Linux Real-Time reaalaja operatsioonisüsteemil.

Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi elektrisüsteemide laboris on kasutusel tööstuskontroller NI cRIO koos ühe pinge sisendmooduliga NI-9205 ja kolme pinge väljundmooduliga NI-9263. Tööstuskontroller koos sisend- ja väljundmoodulitega on esitatud joonisel 4.1.



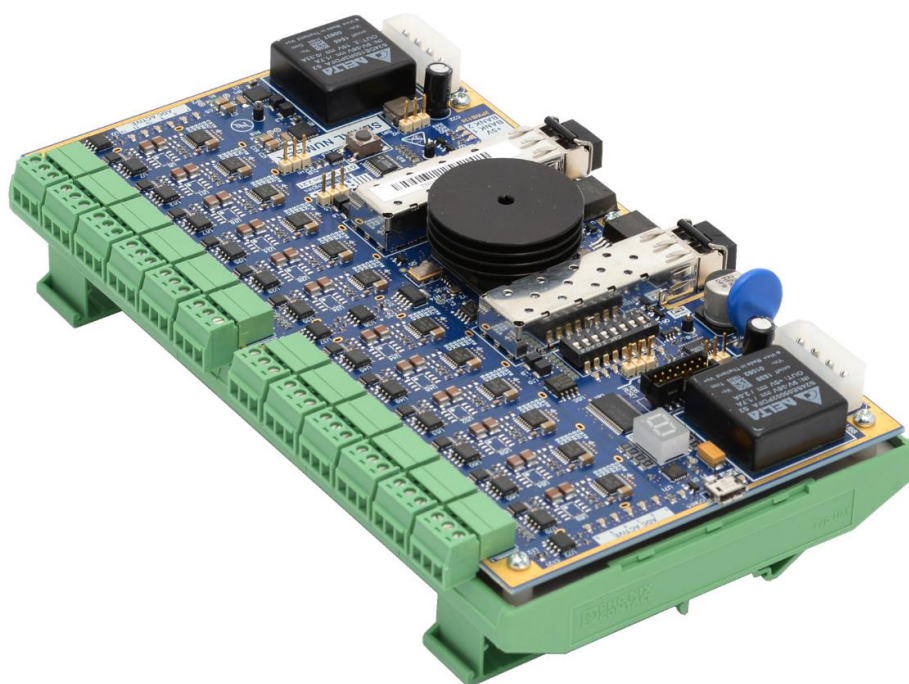
Joonis 4.1 Tööstuskontroller NI CompactRIO 9045 (üleväl) [47], pingesisendimoodul NI-9205 (all vasakul) [48] ja pinges väljundimoodul NI-9263 (all paremal) [49]

Tööstuskontrolleris cRIO-9045 [47] on kahtuümeline Intel Atom E3930 protsessor taktsagedusega 1,3 GHz, 2 GB DDR3L muutmälu ja 4 GB SSD. Laienduspesasid on kasutatud mudelil kaheksa. FPGA moodul põhineb Xilinx Kintex-7 7K70T kiibistikul. Lisaks on kontrolleril kaks Gigabit Ethernet ja kolm USB pesa. USB pesadest üks on tüüp A ja kaks tüüp C, milledest ühte on võimalik kasutada DisplayPort-ina. Samuti on kontrolleril RS-232 ja RS-485 serial pordid.

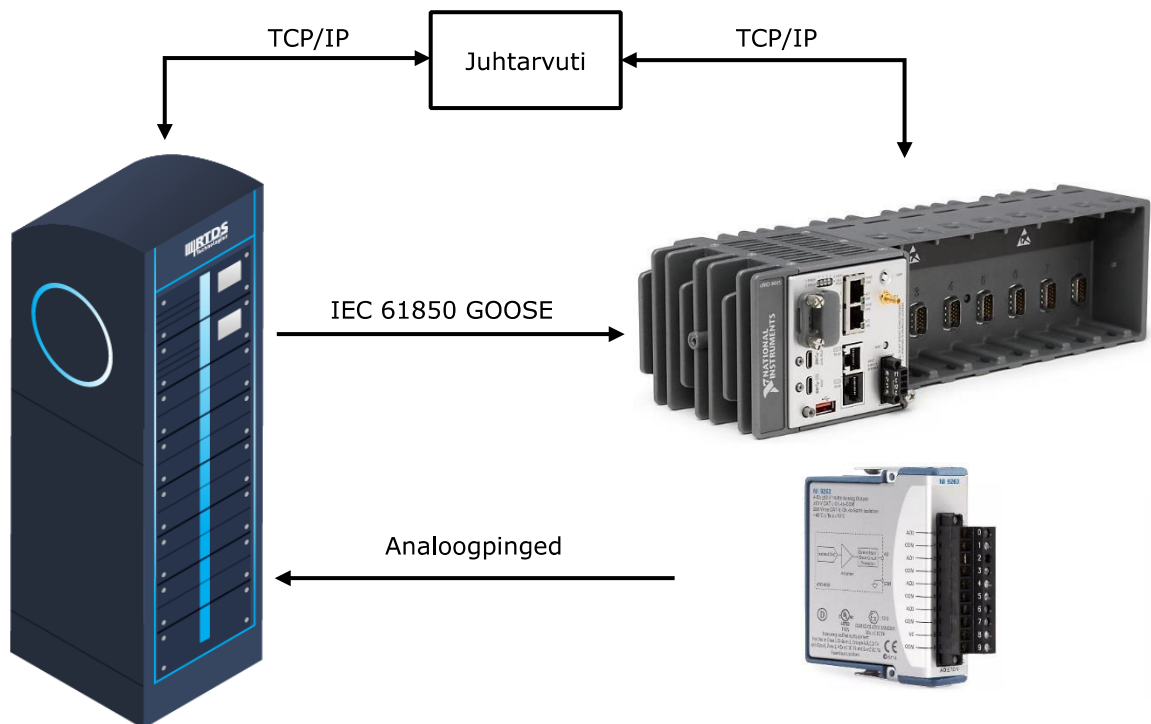
Analoogpinge sisendimoodulil NI-9205 [48] on 16 mõõtesisendit kui mõõtmised on eristavad (*differential*) või 32 mõõtesisendit, kui mõõtmised on ühe otsaga (*single-ended*). Sisendpingete vahemik on +/- 10 V, mõõtetäpsus on selle vahemiku puhul 6230 μV ja tundlikkus 96,0 μV , mis näitab väikseimat muutust, mida moodul on võimeline tuvastama. Maksimaalne diskreetimissagedus on 250 kS/s (kilosämplit sekundis). Analoogpinge väljundimoodulil NI-9263 [49] on 4 pingeväljundit. Väljundpingete vahemik on +/- 10 V ning diskreetimissagedus 100 kS/s/ch (kilosämplit sekundis väljundi kohta).

4.2 Reaalajasimulaatori ja tööstuskontrolleri vaheline andmeside

Tööstuskontrolleril üles ehitatud juhtalgoritmide rakendamiseks reaalajasimulaatoril modelleeritud elektrivõrgul koostati katsestend, mis koosneb lisaks kontrollerile ja reaalajasimulaatorile ka juhtarvutist. Arvuti on mõeldud programmeerimistarkvara LabVIEW ja modelleerimistarkvara RSCAD kasutamiseks, lülituste teostamiseks ja sätteväärtuste määramiseks. RSCAD-is kasutati arvutit näiteks võimsuslülitite lülitamiseks, tootmisüksuste aktiiv- ja reaktiivvõimsuste algväärtuste määramiseks ning koormuste algväärtuste määramiseks ehk RSCAD-is määrati elektrisüsteemi algseisund enne katseid. LabVIEW-s kasutati arvutit juhtimissüsteemi parameetrite, näiteks liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse reguleerimisviisi ja reaktiivvõimsuse sätteväärtuse ning saartalitlusel pinge sätteväärtuse, määramiseks. Arvuti on reaalajasimulaatori ja tööstuskontrolleriga ühendatud läbi Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi sisese internetivõrgu. Reaalajasimulaatorist signaalide edastamiseks tööstuskontrollerisse kasutatakse IEC 61850 GOOSE sõnumeid. Tööstuskontrollerist edastatakse signaalid reaalajasimulaatorisse analoogsignaalidega. Analoogsignaalide vastuvõtmiseks on reaalajasimulaatoris GTAI kaardid [40]. Igal GTAI kaardil on 12 mõõtesisendit. Sisendpingete vahemik on +/- 10 V ja nende diskreetimissagedus 6,0 μ s. Reaalajasimulaatori analoogsisendite kaart GTAI on esitatud joonisel 4.2 ning koostatud katsestendi põhimõtteskeem joonisel 4.3.



Joonis 4.2 Reaalajasimulaatori analoogsisendite kaart GTAI [50]

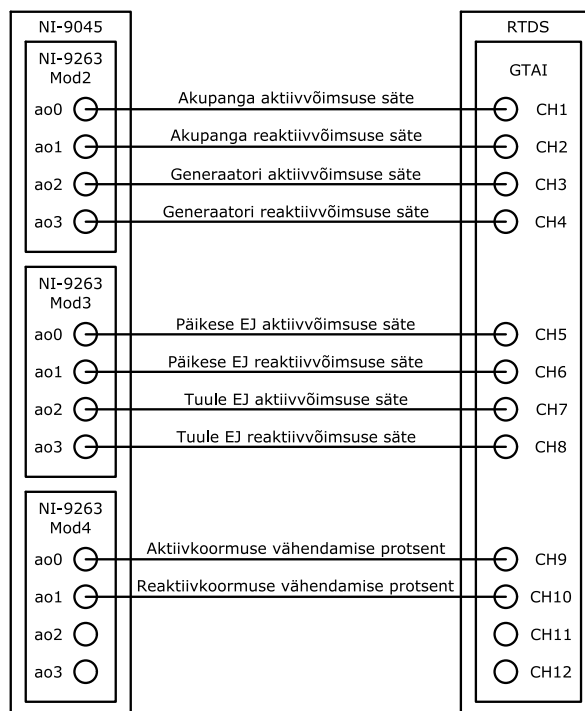


Joonis 4.3 Koostatud katsestandi põhimõtteskeem

Reaalajasimulaatorist edastatakse tööstuskontrollerisse:

- liitumispunkti läbiva aktiiv- ja reaktiivvõimsuse sätteväärtus;
- kõikide tootmisüksuste aktiiv- ja reaktiivvõimsuste mõõteväärtused;
- kõikide tootmisüksuste aktiiv- ja reaktiivvõimsuste sätteväärtused;
- kõikide tootmisüksuste maksimaalsed ja minimaalsed võimalikud aktiiv- ja reaktiivvõimsused;
- koostootmisjaama sünkroongeneraatori maksimaalne tarbimissuunaline reaktiivvõimsus;
- akupanga laetuse tase;
- alajaama AJ1 (joonis 3.1) teise sektsiooni pinge;
- elektrivõrgu sagedus;
- elektrivõrgus esinev minimaalne ja maksimaalne pinge;
- elektrivõrgu summaarsed aktiiv- ja reaktiivkoormused;
- kõikide tootmisüksuste töös olekud;
- võimsuslüliti CB2 (joonis 3.1) asend;
- liitumispunkti läbiva aktiiv- ja reaktiivvõimsuse käivitus.

Tööstuskontrollerist edastatakse reaalajasimulaatorisse kõikide tootmisüksuste aktiiv- ja reaktiivvõimsuste uued sätteväärtused ning koormuse vähendamise protsent. Tööstuskontrolleri ja reaalajasimulaatori analooghenduste skeem on esitatud joonisel 4.4.



Joonis 4.4 Tööstuskontrolleri ja reaalajasimulaatori analoogühenduste skeem

4.3 Juhtalgoritmide ülesehitus tööstuskontrolleril

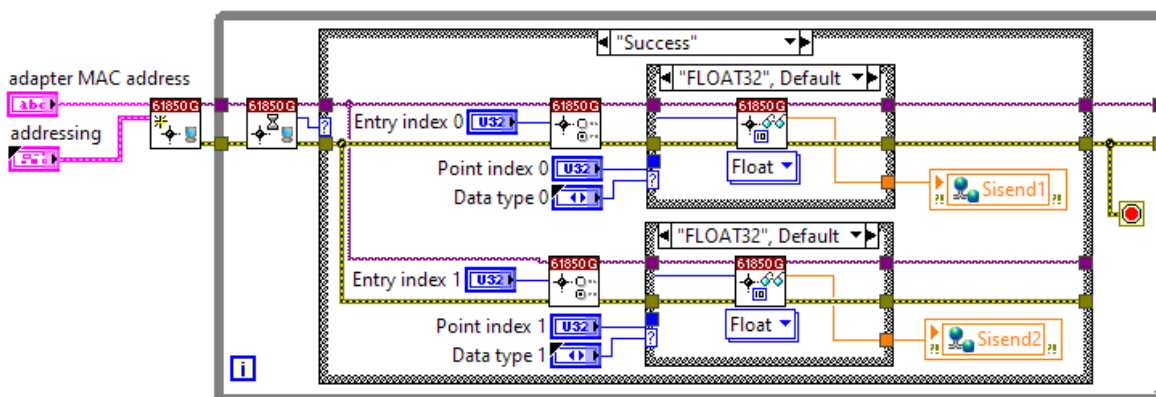
Tööstuskontrolleril koostatud juhtalgoritmid põhinevad eelnevalt reaalajasimulaatoril koostatud juhtalgoritmidel, mida kirjeldati lõputöö kolmandas peatükis. Käesolevas lõputöö osas kirjeldatakse programmeerimistarkvaras LabVIEW tööstuskontrolleril koostatud juhtalgoritme ja nende erinevusi reaalajasimulaatori juhtalgoritmidest. Tööstuskontrolleril lisati juhtalgoritmid sagedusega seotud süsteemiteenuste pakkumiseks ning täiendati liitumispunkti läbivate reaktiivvõimsuste juhtalgoritme reaktiivvõimsusega seotud süsteemiteenuste pakkumiseks.

4.3.1 Tööstuskontrolleril koostatud juhtalgoritmide abisüsteemide põhimõtted

Tööstuskontrolleril koostatud juhtalgoritmide abisüsteemid baseeruvad lõputöö kolmandas peatükis kirjeldatud abisüsteemide põhimõtetel. Reaalajasimulaator täidab siinkohal lisaks elektrivõrgu simuleerimisele ka tööstusettevõtte elektrivõrgu kohaliku SCADA eesmärgi. See tähendab, et reaalajasimulaatoris tuvastatakse tootmisüksuste

töös või väljas olekud, elektrivõrgus esinev minimaalne ja maksimaalne pinge ning summaarne aktiiv- ja reaktiivkoormus. Juhtimissüsteemi nimetatud osade lõpptulemused edastatakse reaalajasimulaatorist tööstuskontrollerisse vastavate signaalidega. Järgnevalt kirjeldatakse GOOSE sõnumite vastuvõtmist, analoogpingete väljastamist, maksimaalsete reguleerimisvõimsuste arvutusi ja õige regulaatori valikut LabVIEW-s.

Reaalajasimulaatorist andmete väljastamiseks kasutatakse IEC 61850 GOOSE sõnumeid. Andmed väljastatakse ühe *dataset*-ina ehk igas väljastatavas GOOSE sõnumis on kõik andmed. Tööstuskontrolleris GOOSE sõnumite vastuvõtmiseks koostati joonisel 4.5 esitatud funktsioon.

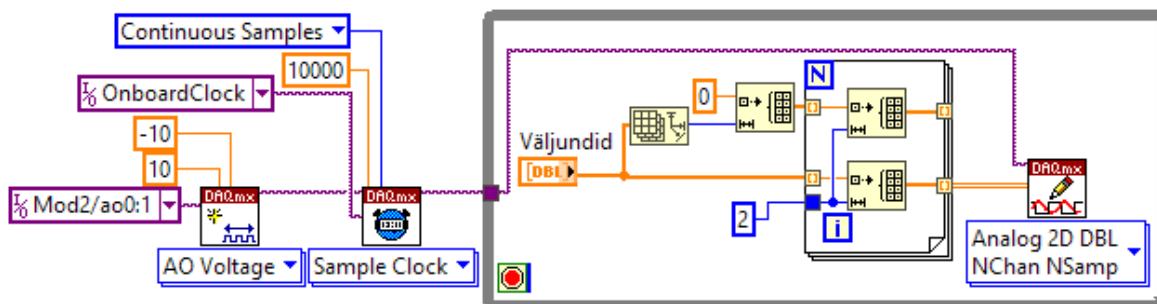


Joonis 4.5 Funktsioon tööstuskontrolleris GOOSE sõnumite vastuvõtmiseks

GOOSE sõnumite väljastamisel ei kasutata vastuvõtja adresseerimist ehk sõnumeid võivad vastu võtta kõik samasse võrku ühendatud seadmed. Seetõttu peab vastuvõtjas ehk tööstuskontrolleris määrama saatja MAC aadressi ning *dataset*-i nimetuse, mis on joonisel 4.5 esitatud sisendina *addressing*. Lisaks on koostatud funktsiooni sisendiks ka tööstuskontrolleri enda MAC aadress, joonisel 4.5 *adapter MAC address*. GOOSE sõnumite *dataset*-i võib lihtsustatult vaadelda kui ühte vektorit, kus igas reas on erinev teade, näiteks mõõteväärtus või lüliti asend. Joonisel 4.5 esitatud muutujatega *Entry index 0* ja *Entry index 1* ning *Data type 0* ja *Data type 1* määratakse vastavalt mitmendat teadet *dataset*-ist loetakse ja mis on selle teate tüüp. Joonisel 4.5 esitatud funktsiooni näitel võetakse vastu *dataset*-i esimene ja teine teade, mis on reaalarvulised muutujad. Esimese ja teise teate vastuvõtmiseks määratakse muutujate *Entry index 0* ja *Entry index 1* väärtuseks 0 ja 1, sest LabVIEW alustab vektoreid indeksist 0. Vastuvõetud teated väljastatakse projektisiselt jagatavate muutujatena *Sisend1* ja *Sisend2*. Töö LabVIEW-ga seisneb projektide koostamises kuhu on võimalik lisada erinevaid funktsioone ehk VI-sid (*Virtual Instrument*) ja ühest funktsioonist väljastatavat jagatud muutujat on võimalik projektisiselt kasutada teistes

funktsioonides. Siinkohal tuleb tähele panna, et joonisel 4.5 esitatud funktsioon võtab vastu ainult kaks teadet. Järgnevate teadete vastuvõtmiseks on võimalik funktsiooni analoogselt joonisel 4.5 esitatuga laiendada.

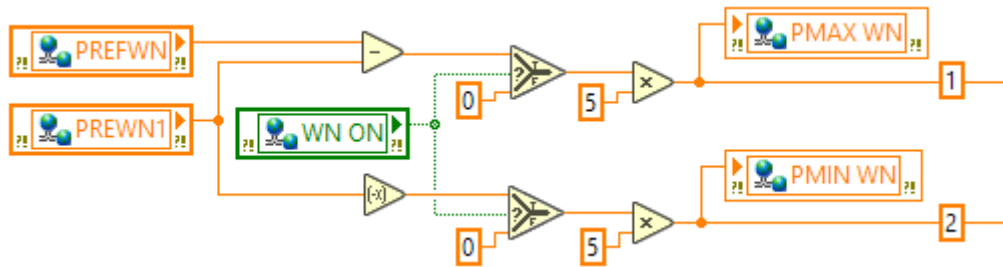
Tootmisüksuste aktiiv- ja reaktiivvõimsuste uute sätteväärtuste ning koormuse vähendamise protsendi väljastamiseks tööstuskontrollerist kasutati analoogsignaale, milleks koostati joonisel 4.6 esitatud funktsioon.



Joonis 4.6 Funktsioon analoogsignaali väljastamiseks tööstuskontrollerist

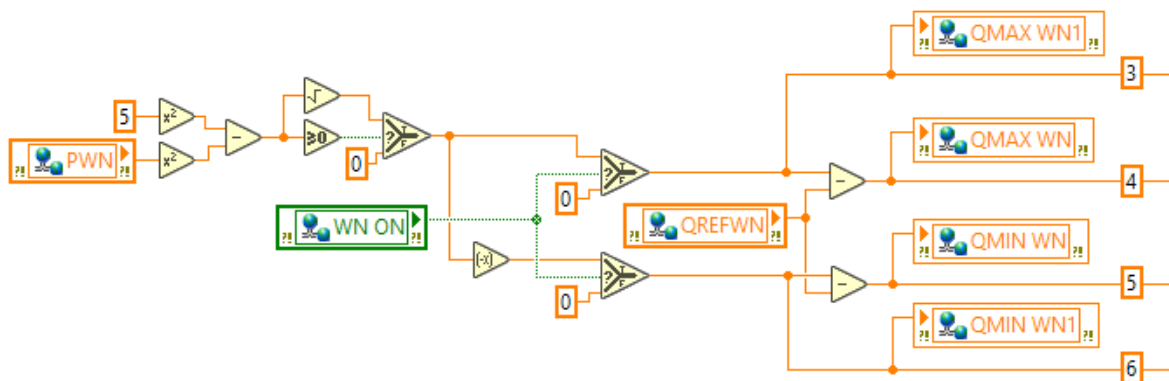
Joonisel 4.6 esitatud funktsiooni esimeses ploki (plokk alatähisega *AO Voltage*) määratakse, millist tüüpi signaali väljastatakse, milliseid väljundeid kasutatakse (*Mod2/ao0:1*) ning mis on minimaalne ja maksimaalne väljastatav pinge (konstandid 10 ja -10). Joonise 4.6 näitel väljastatakse analoogpingeid vahemikus -10...10 V esimese ja teise pingeväljundiga. Järgnevas ploki määratakse väljundisignaali edastussagedus, milleks praegusel juhul on 10000 S/s (sämplit sekundis). Muutujaga *Väljundid* määratakse signaalid, mida edastatakse. Lõputöös on muutuja *Väljundid* 10 muutujaga veeruvektor. Analooghendustes tekkivate häiringute vähendamiseks muudetakse veeruvektor kahe veeruga maatriksiks, kus teises veerus on esimese veeru muutujate väärtustega samad väärtused. Põhimõtteliselt tähendab see ühe signaali edastamist kaks korda. Siinkohal on oluline, et *WHILE* tsükkel (joonisel 4.6 hall ristkülik) oleks paigutatud nii nagu näidatud joonisel 4.6. Funktsiooni esimese kahe ploki lisamine *WHILE* tsükklisse muudab selle töö aeglaseks ja seega ei ole tööstuskontroller võimeline juhtima kiireid protsesse, näiteks saartalitlust.

Tootmisüksuste maksimaalsete ja minimaalsete reguleerimisvõimsuste arvutusi kirjeldati täpsemalt lõputöö jaotises 3.8.1. Joonistel 4.7 ja 4.8 esitatud tuuleelektrijaama näitel selle maksimaalse ja minimaalse reguleeritava aktiiv- ja reaktiivvõimsuse arvutused LabVIEW-s.



Joonis 4.7 Tuuleelektrijaama maksimaalse ja minimaalse reguleeritava aktiivvõimsuse arvutus LabVIEW-s

Joonisel 4.7 esitatud arvutuses on sisenditeks reaalajasimulaatorist vastuvõetud muutujad *PREFWN*, *PREFWN1* ja *WN_ON*. Muutuja *PREFWN* tähistab tuuleelektrijaama maksimaalset võimalikku aktiivvõimsust. Muutuja *PREFWN1* tähistab aktiivvõimsuse sätteväärtust. Muutuja *WN_ON* tähistab tuuleelektrijaama töös või väljas olekut. Juhul kui see on töös, on muutuja *WN_ON* väärtus 1 ja vastupidi. Muutujad *PREFWN* ja *PREFWN1* on suhtelistes ühikutes, seega korrutatakse *KUI*-lüli väljund tuuleelektrijaama nimivõimsuse ehk viiega. Saadud tulemus edastatakse jagatud muutujana *PMAX_WN* ja läbi ahela 1 summa lülisse, kus liidetakse kõikide tootmisüksuste maksimaalsed reguleeritavad aktiivvõimsused. Tuuleelektrijaama minimaalne reguleeritav aktiivvõimsus on selle aktiivvõimsuse sätteväärtuse negatiivne väärtus. Tulemus edastatakse jagatud muutujana *PMIN_WN* ning läbi ahela 2 summa lülisse, kus liidetakse kõikide tootmisüksuste minimaalsed reguleeritavad aktiivvõimsused.

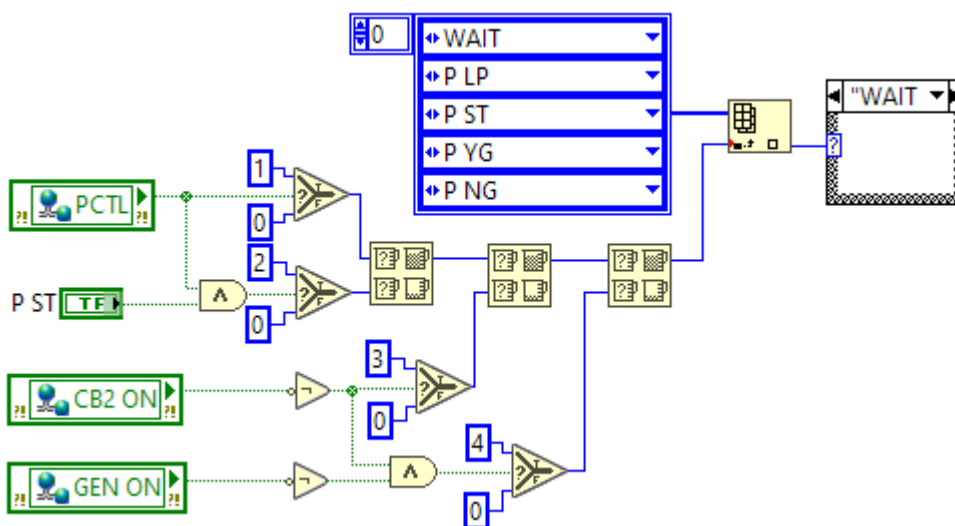


Joonis 4.8 Tuuleelektrijaama maksimaalse ja minimaalse reguleeritava reaktiivvõimsuse arvutus LabVIEW-s

Joonisel 4.8 esitatud arvutuse sisenditeks on konstant 5 ning muutujad *PWN* ja *WN_ON*. Konstant 5 tähistab tuuleelektrijaama niminäivvõimsust ja muutuja *PWN* tuuleelektrijaama hetkel toodetavat aktiivvõimsust. Muutuja *WN_ON* on sama eelnevalt kirjeldatuga. Arvutuse alguses leitakse tuuleelektrijaama aktiiv- ja niminäivvõimsuse alusel selle maksimaalne reaktiivvõimsus, mis edastatakse *KUI*-lülisse. *KUI*-lüli kasutatakse, et vältida olukord, kui ruutjuure all negatiivse väärtuse korral

edastatakse määramatu suurus NaN , mis põhjustab vigu juhtimissüsteemi töös. Järgnevalt kontrollitakse *KUI*-lülidega tuuleelektrijaama töös olekut ning edastatakse õiged väärtused. Jooniselt 4.8 on näha, et antud arvutuste tulemused edastatakse nelja muutujaga: $QMAX_WN1$, $QMAX_WN$, $QMIN_WN$ ja $QMIN_WN1$. Muutujad $QMAX_WN$ ja $QMIN_WN$ tähistavad tuuleelektrijaama reaktiivvõimsuse reguleerimisulatust järjestikulisel reguleerimisel ning muutujad $QMAX_WN1$ ja $QMIN_WN1$ võrdelisel ja proportsionaalsel reguleerimisel. Lisaks edastatakse arvutuste tulemused ahelate 3...6 kaudu vastavatesse summa lülidesse.

Eelnevalt kirjeldatud juhtimissüsteemi osad koostati eraldi abifunktsioonidena. Need kutsutakse välja põhifunktsioonist, mis hõlmab ülejäänud juhtimissüsteemi osasid. Õige aktiivvõimsuse reguleerimisrežiimi valikuks koostati joonisel 4.9 esitatud loogikalülitus.

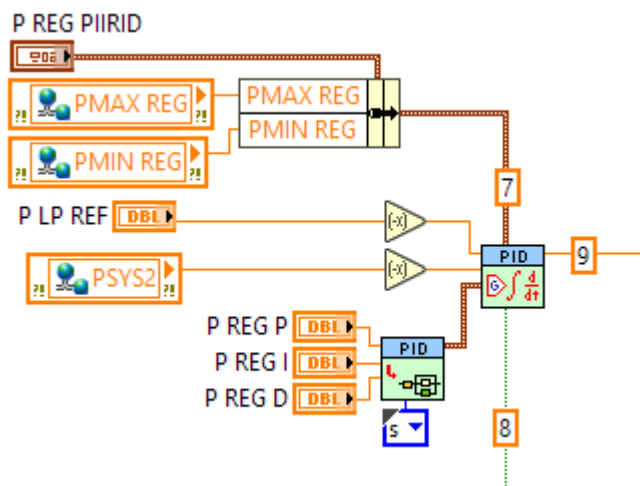


Joonis 4.9 Aktiivvõimsuse õige reguleerimisrežiimi valikuks koostatud loogikalülitus

Joonisel 4.9 esitatud loogikalülituse sisendid $PCTL$, $CB2_ON$ ja GEN_ON on reaajasimulaatorist vastuvõetud signaalid, mis tähistavad vastavalt liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimise käivitamist, võimsuslüliti $CB2$ asendit (joonis 3.1) ja sünkroongeneraatori töös või väljas olekut. Sisend $P ST$ on muudetav tööstuskontrolleris ja sellega aktiveeritakse sagedusega seotud süsteemiteenused. Loogikalülitus põhineb olukorra tähtsuse määramisel, milleks kasutatakse *Min & Max* lülisid. Kõige tähtsam on sünkroongeneraatorita saartalitlus (väärtus 4) ja kõige vähem tähtis liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimine (väärtus 1). Olukorrale vastava väärtuse alusel valitakse õige regulaator. Joonisel 4.9 tähistab *WAIT* kontrolleri ootel olekut, *P LP* liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimist, *P ST* sagedusega seotud süsteemiteenuste pakkumist, *P YG* sünkroongeneraatoriga saartalitlust ja *P NG* generaatorita saartalitlust. Reaktiivvõimsuse regulaatori valik toimub analoogselt.

4.3.2 Liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimine

Liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimine toimub lõputöö jaotises 3.8.2 paika pandud põhimõtetal. Joonisel 4.10 on esitatud liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimiseks koostatud regulaator. Ülejäänud regulaatorite puhul kasutatakse analoogset lahendust.



Joonis 4.10 Liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimiseks koostatud PID regulaator

Joonisel 4.10 on ahelaga 7 tähistatud PID regulaatori piirajad, muutujaga *P LP REF* liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse sätteväärtus, muutujaga *PSYS2* liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse mõõteväärtus ning muutujatega *P REG P*, *P REG I*, *P REG D* vastavalt PID regulaatori proportsionaalse lüli võimendustegur, integraalse lüli ajakonstant ja diferentseeriva lüli ajakonstant. PID regulaatori ja selle parameetrite vahel kasutati teisenduslüli, millega viidi integraalse lüli ajakonstandi ühik sekunditesse (LabVIEW lähteseades on selleks minutid). Ahel 8 on mõeldud regulaatori väljundi nullimiseks. Regulaatori väljund edastatakse ahela 9 kaudu. Tööstuskontrolleril koostatud juhtalgoritmide toimed sooviti viia võimalikult sarnaseks reaajasimulaatori juhtalgoritmide toimele. Samas ei ole tööstuskontrolleris võimalik kasutada reaajasimulaatoril kasutatud regulaatorite parameetreid. LabVIEW PID regulaatorit saab kirjeldada avaldisega 4.1 ja reaajasimulaatoris koostatud PI regulaatorit joonise 3.9 põhjal avaldisega 4.2.

$$X = ERR \cdot K_P \cdot \left(1 + \frac{1}{sT_I} + sT_D \right) \quad (4.1)$$

$$PLP1 = ERR \cdot PLP_GAIN + \frac{ERR}{sPLP_TIME} \quad (4.2)$$

kus X – regulaatori väljund;
 ERR – regulaatori sisend;

- K_P – proportsionaalse lüli võimendustegur;
- T_I – integraalse lüli ajakonstant, s;
- T_D – diferentseeriva lüli ajakonstant, s.

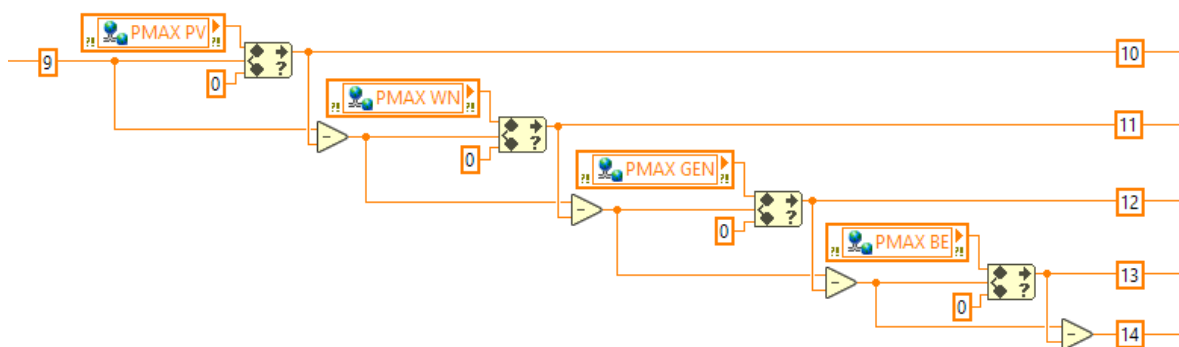
Võrreldes avaldisi 4.1 ja 4.2 on näha, et need ei ole üks-ühele vastavuses. LabVIEW-s avaldab proportsionaalse lüli võimendustegur mõju ka integraalse ja diferentseeriva lüli toimele. Lisaks peab LabVIEW-s regulaatori toimimiseks määrama alati proportsionaalse lüli võimendusteguri. Juhtalgoritmide arendati esmalt välja reaalajasimulaatoril ja katsete käigus leiti liitumispunkti läbivate võimsuste ja saartalitluse regulaatorite sobivad parameetrid. Seega teisendati reaalajasimulaatori integraalsete lülide ajakonstandid võrdeliseks LabVIEW ajakonstantidega, milleks kasutati avaldist 4.2.

$$T_{I\text{ LabVIEW}} = K_{P\text{ LabVIEW}} \cdot T_{I\text{ RTDS}} \quad (4.2)$$

- kus $T_{I\text{ LabVIEW}}$ – integraalse lüli ajakonstant LabVIEW-s, s;
- $K_{P\text{ LabVIEW}}$ – proportsionaalse lüli võimendustegur LabVIEW-s;
- $T_{I\text{ RTDS}}$ – integraalse lüli ajakonstant reaalajasimulaatoris; s.

LabVIEW-s määrati proportsionaalse lüli võimendustegur võrdseks reaalajasimulaatori proportsionaalse lüli võimendusteguriga. Juhul kui reaalajasimulaatoril kasutati ainult integraalset regulaatorit, määrati LabVIEW-s proportsionaalse regulaatori võimendusteguriks 0,01.

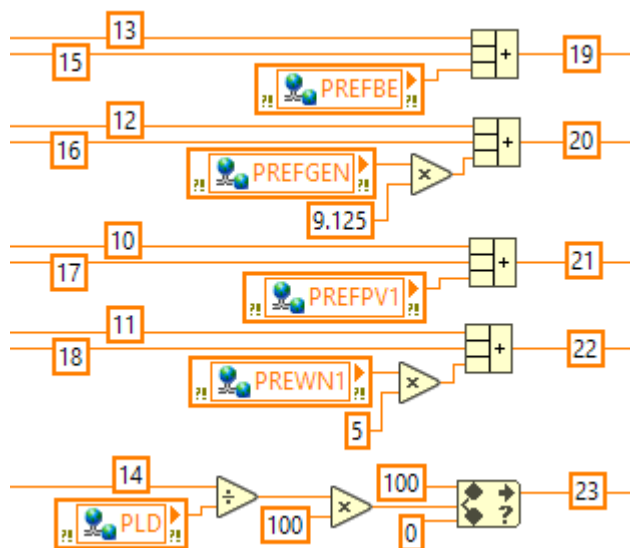
Liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse järjestikuline reguleerimine toimub LabVIEW-s joonisel 4.11 esitatud viisil.



Joonis 4.11 Liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse järjestikuline reguleerimine

Joonisel 4.11 esitatud juhtahelat kasutatakse tootmisüksuste aktiivvõimsuste tõstmiseks. Juhtahel saab sisendi ahelast 9 ehk joonisel 4.10 esitatud regulaatori väljundist. Esimesena tõstetakse päikeseelektrijaama aktiivvõimsust ehk regulaatori

väljund edastatakse ahela 10 kaudu joonisel 4.12 esitatud juhtahelasse. Peale päikeseelektrijaama maksimaalse reguleeritava aktiivvõimsuse saavutamist lukustatakse ahela 10 väärtuse edasine tõus. Seega on võrdluslüli sisend ja väljund erinevad ning nende vahe edastatakse tuuleelektrijaama aktiivvõimsuse tõstmiseks ahela 11 kaudu. Ahelate 12 ja 13 kaudu tõstetakse vastavalt sünkroongeneraatori ja akupanga aktiivvõimsust. Ahela 14 kaudu edastatud väärtust kasutatakse aktiivkoormuse vähendamiseks. Tootmisüksuste aktiivvõimsuste vähendamiseks koostati joonisel 4.11 esitatuga analoogne lülitus. Erinevuseks on tootmisüksuste järjekord ja võrdluslülide minimaalse piiri 0 asemel on iga tootmisüksuse minimaalne reguleeritav aktiivvõimsus ja maksimaalsete piiride asemel nullid. Joonisel 4.12 on esitatud juhtahel tootmisüksuste aktiivvõimsuste muutmiseks.



Joonis 4.12 Lülitus tootmisüksuste aktiivvõimsuste muutmiseks

Joonisel 4.12 esitatud sisendahelad 10...14 vastavad joonisel 4.11 esitatud väljundahelatele. Reguleeritava aktiivvõimsuse osa liidetakse tootmisüksuse sätteväärtusele ehk sellele, mida tootmisüksus tootis enne reguleerimise alustamist. Ahelaid 15...18 kasutatakse tootmisüksuste aktiivvõimsuste vähendamiseks. Tootmisüksuste uued aktiivvõimsuste sätteväärtused ja koormuse vähendamise protsent edastatakse ahelate 19...23 kaudu analoogsignaali väljastamise funktsiooni.

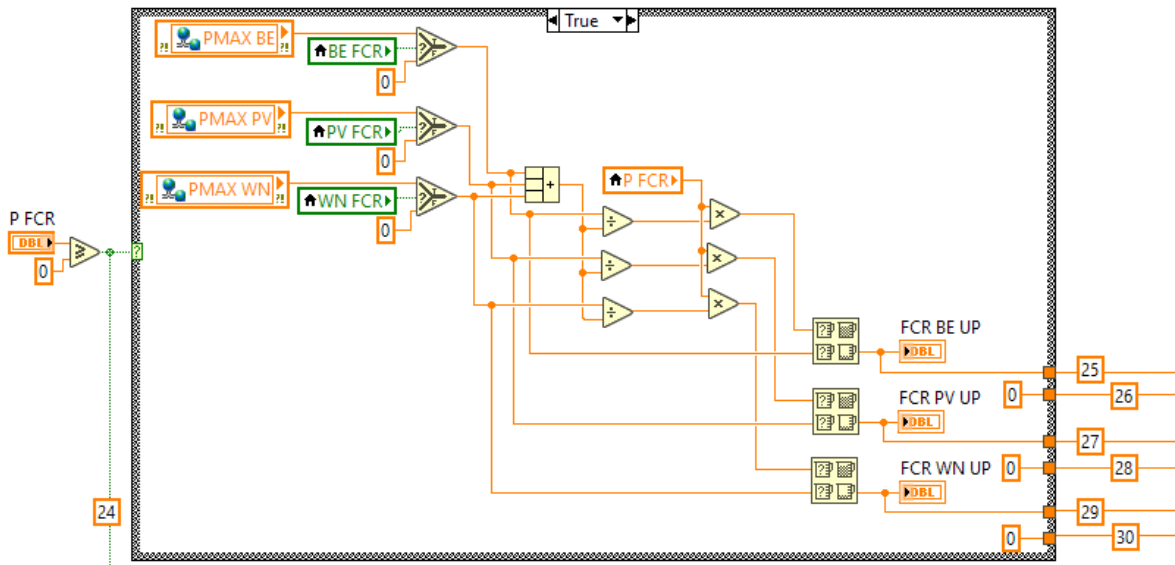
4.3.3 Sagedusega seotud süsteemiteenused

Tööstuskontrolleri juhtimissüsteemi lisati algoritmid sagedusega seotud süsteemiteenuste pakkumiseks. Sageduse hoidmise reservide süsteemiteenuse

pakkumiseks koostati juhtalgoritm nii, et nimetatud teenust on võimalik pakkuda akupanga ning päikese- ja tuuleelektrijaamaga. Eeldati, et sageduse hoidmise reservide töös hoidmise aeg on lühem kui sageduse taastamise reservide ja asendusreservide töös hoidmise aeg ning, et ilmastikuolusid on selle aja vältel võimalik täpselt ennustada. Samas lisati juhtalgoritmi võimalus igat elementi sageduse hoidmise reservidest eraldi välja jätta. Sageduse taastamise reservidena ja asendusreservidena kasutati akupanga ja sünkroongeneraatorit, mida on samuti võimalik vastavalt vajadusele reservidest eraldi välja jätta. Kiiret sageduse reageeringut vaadeldakse katsete käigus eraldi ja selle jaoks eraldi juhtalgoritmi ei koostatud.

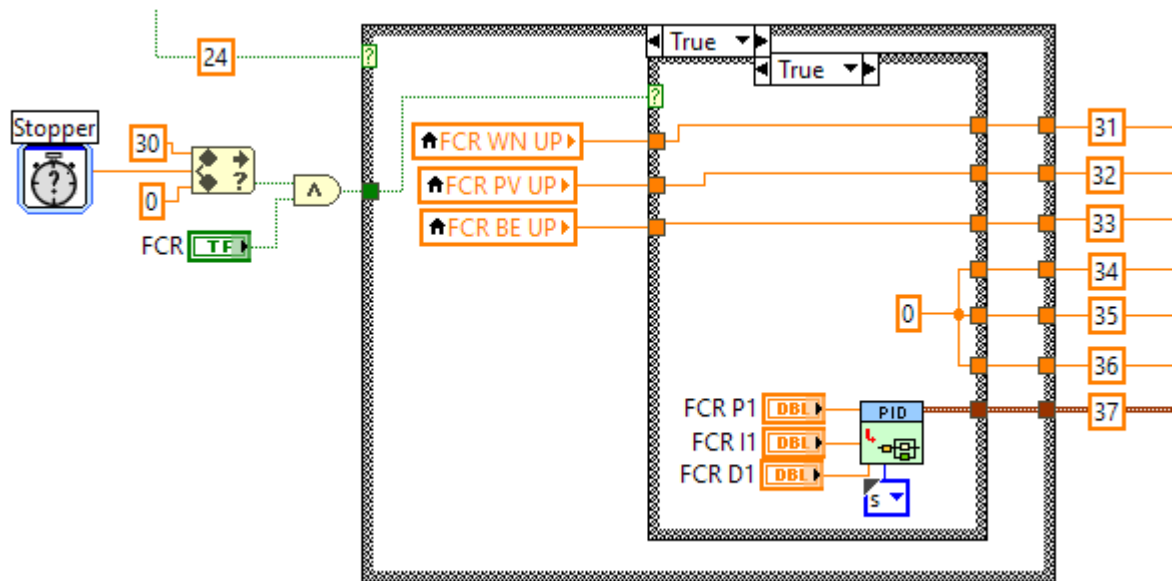
Balti riikide sagedus-koormusjuhtimise kontseptsioonilahenduses [6] on välja toodud, et sageduse taastamise reserve pakkuvaid tootmisüksusi võib agregeerida juhul kui nende summaarne aktiivvõimsus ei ületa 1,5 MW. Samas on lõputöös kasutatud akupanga ning päikese- ja tuuleelektrijaama summaarne võimsus 15 MW. Sageduse kõrvalekallet simuleeritakse aktiivvõimsuse sätteväärtusega. Selleks, et kõik sageduse hoidmise reservides osalevad tootmisüksused reageeriks samal määral, kasutatakse aktiivvõimsuse sätteväärtuse proportsionaalset jaotamist. Erinevalt liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse reguleerimisest jaotatakse siin aktiivvõimsus proportsionaalselt lähtuvalt iga tootmisüksuse reservvõimsuse hulgast ja nende summast. Sama lähenemisviisi kasutatakse ka sageduse taastamise reservide ja asendusreservide puhul. Järgnevalt kirjeldatakse tööstuskontrolleril koostatud juhtalgoritmide ülesehitust sageduse hoidmise reservide põhjal. Teiste sagedusega seotud süsteemiteenuste juhtalgoritmid on analoogsed.

Sageduse hoidmise reservide pakkumiseks kasutatakse iga tootmisüksuse jaoks eraldi regulaatorit. Erinevus teistest regulaatoritest seisneb nende kasutusviisis. Liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse näitel oli regulaatori sisendiks aktiivvõimsuse mõõte- ja sätteväärtuse vahe. Reguleerimise lõpuks viidi see vahe nulli. Seega muutus regulaatori väljundi muutumise kiirus reguleerimise käigus aeglasemaks. Sagedusega seotud süsteemiteenuste pakkumisel taheti saavutada liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse võimalikult lineaarne muutumine. Seega määratakse iga tootmisüksuse aktiivvõimsuse sätteväärtus regulaatori piirajana. Regulaatori sisendiks olevad sätte- ja mõõteväärtus on seejuures konstantsed ehk reguleerimise ajal on regulaatori väljundi muutumise kiirus ühtlane. Regulaatorite piirajate määramiseks koostatud lülitus on esitatud joonisel 4.13.



Joonis 4.13 Sageduse hoidmise reserve regulaatorite piirajate määramiseks koostatud lülitus

Joonisel 4.13 esitatud muutujaga $P FCR$ simuleeritakse sageduse kõrvalekalde suurust, millele vastab teatud aktiivvõimsus, mille võrra tootmisüksused peavad enda aktiivvõimsust muutma. Joonisel 4.13 esitatud arvutus teostatakse juhul kui toimub sageduse langus ehk $P FCR$ on suurem kui null või kui sageduse kõrvalekallet ei esine. Viimasel juhul on arvutuse väljunditeks nullid. Joonisel 4.13 esitatud muutujad $P MAX BE$, $P MAX PV$ ja $P MAX WN$ tähistavad vastavalt akupanga, päikeseelektrijaama ja tuuleelektrijaama reservvõimsuse hulka ehk seda palju on vastava tootmisüksusega võimalik aktiivvõimsust tõsta. Muutujad $BE FCR$, $PV FCR$ ja $WN FCR$ tähistavad kas vastav tootmisüksus osaleb reservi pakkumises või mitte. Esimesel juhul valitakse KUI -lülil ülemine väljund ja teisel juhul alumine väljund ehk null. Järgnevalt liidetakse kõikide tootmisüksuste reservvõimsused, millega iga tootmisüksuse reservvõimsuse jagamisel saadakse vastava tootmisüksuse osakaal reguleerimise eesmärgi täitmisel. Seejärel korrutatakse sageduse kõrvalekallet simuleeriv muutuja $P FCR$ iga tootmisüksuse osakaaluga, millest saadakse aktiivvõimsuse sätteväärtus, mille võrra vastav tootmisüksus peab aktiivvõimsust tõstma. Järgnevalt sisenevad nii aktiivvõimsuse sätteväärtus kui ka vastava tootmisüksuse maksimaalne aktiivvõimsus $Max \& Min$ lülisse, kus valitakse neist väiksem. See on oluline, et vältida PID regulaatori väljundi liigset tõusu, mis põhjustaks aktiivvõimsuse muutmises viiteid. Järgnevalt väljastatakse uued aktiivvõimsuse sätteväärtused muutujatena $FCR BE UP$, $FCR PV UP$ ja $FCR WN UP$ ja vastavalt ahelate 25...29 kaudu regulaatorite maksimaalsete väärtuste piirajatena. Ahelate 26...30 kaudu määratakse regulaatori minimaalseteks väärtusteks nullid. Sageduse tõusul kasutatakse joonisel 4.13 esitatud lülitusega analoogset lahendust. Sellisel juhul on lülituses minimaalsed aktiivvõimsused ja lõpus valitakse maksimaalne väärtus. Joonisel 4.14 esitatud PID regulaatorite sisendite määramiseks kasutatud lülitus.

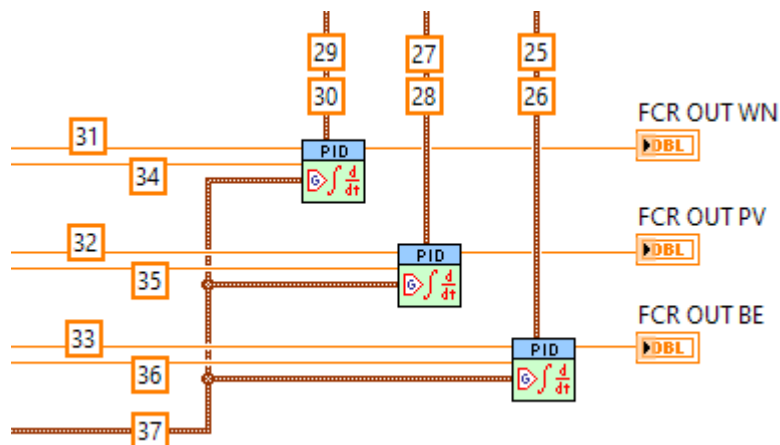


Joonis 4.14 Sageduse hoidmise reserve regulaatorite sisendite määramiseks koostatud lülitus

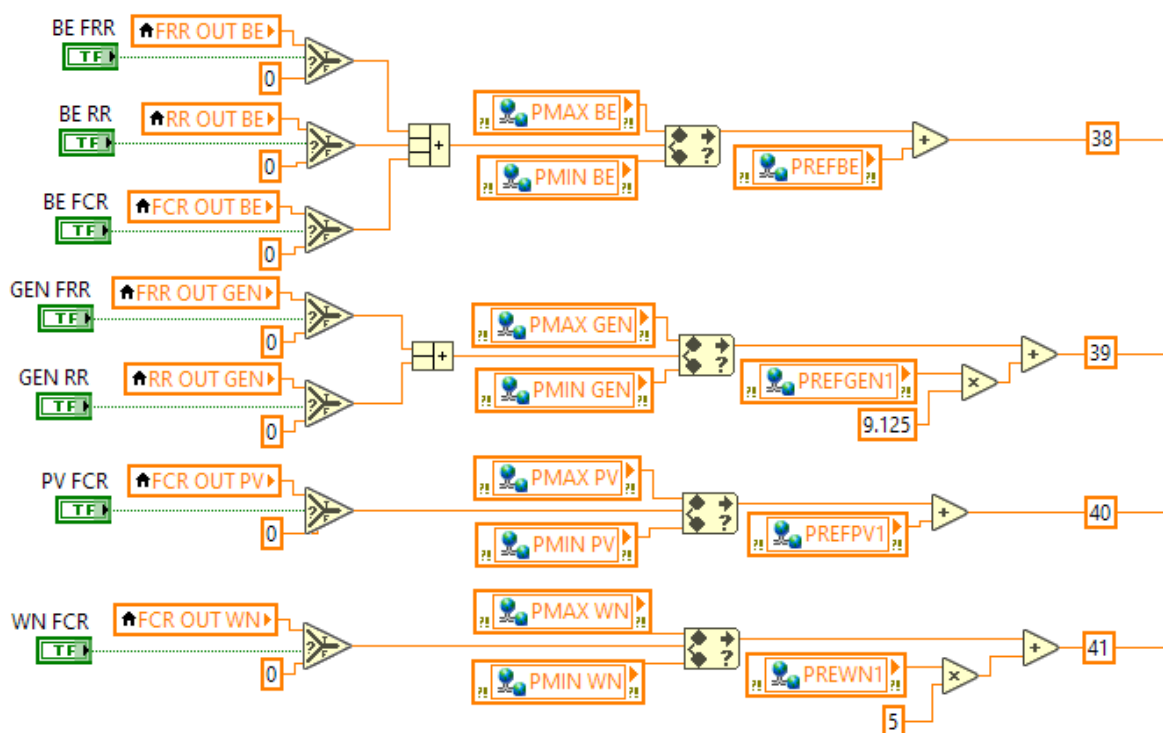
Joonisel 4.14 esitatud sisendahela 24 kaudu saadakse eelnevast lülitusest (joonis 4.13) informatsioon, kas toimub aktiivvõimsuse tõstmine või langetamine. Aktiivvõimsuse tõstmisel on välimise kasti väärtuseks *True*. Joonisel esitatud sisemises kastis olev lülitus teostatakse juhul kui lüliti *FCR* väärtus on 1 ja stopperi väljund on vahemikus 0...30 sekundit. Lülitiga *FCR* simuleeritakse sageduse hoidmise reserve aktiveerimist ehk ollakse ooteseisundis kuni täitub tingimus reserve käivitamiseks. Stopperi väärtusega 0 simuleeritakse olukorda, kus sagedus on nimiväärtusest üle 10 mHz kõrvale kaldunud ja väärtusega 20 sageduse hoidmise reserve välja lülitamist ehk tegelikkuses peaksid neid asendada vastavad juhtsignaalid. Reserve käivitamisel edastatakse ahelate 31...33 kaudu eelnevalt (joonis 4.13) arvutatud aktiivvõimsused regulaatori sätevärtusteks. Ahelate 34...36 kaudu edastatakse regulaatori mõõtesisenditesse nullid. Reserve välja lülitamisel vahetatakse null ja aktiivvõimsused. Ahela 37 kaudu väljastatakse regulaatori proportsionaalse lüli võimendustegur ning integraalse ja derivatiivse lüli ajakonstandid, mis on kõikidele regulaatoritele samad. Joonisel 4.15 on esitatud regulaatorid, mida kasutati iga tootmisüksuse aktiivvõimsuse reguleerimiseks.

Joonisel 4.15 esitatud sisendahelad 25...37 tähistavad joonistel 4.13 ja 4.14 esitatud väljundahelaid. Sageduse langemisel akupanga näitel siseneb ahela 33 kaudu regulaatori sätevärtuse sisendisse väärtus, mille võrra akupank peab enda aktiivvõimsust tõstma. Ahela 36 kaudu siseneb konstantne null regulaatori mõõtevärtuse sisendisse. Seega hakkab regulaatori väljund *FCR OUT BE* suurenema, kuid kuna mõõtevärtus ei muutu on regulaatori väljundi muutus lineaarne. Ahela 25 ja 26 kaudu sisenevad regulaatori maksimaalne ja minimaalne võimalik väärtus ehk

aktiivvõimsuse sätteväärtus, milleni regulaatori väljund suurenda saab. Reservi välja lülitamisel siseneb ahela 33 kaudu konstantne null ja ahela 36 kaudu sätteväärtus. Kuna mõõteväärtus ei muutu ja on suurem sätteväärtusest hakkab regulaatori väljund lineaarselt vähenema. Joonisel 4.15 esitatud väljundmuutujad *FCR OUT WN*, *FCR OUT PV* ja *FCR OUT BE* edastatakse joonisel 4.16 esitatud lülitusse.



Joonis 4.15 Iga tootmisüksuse aktiivvõimsuse muutmiseks kasutatud PID regulaatorid



Joonis 4.16 Tootmisüksuste aktiivvõimsuste uute sätteväärtuse määramine

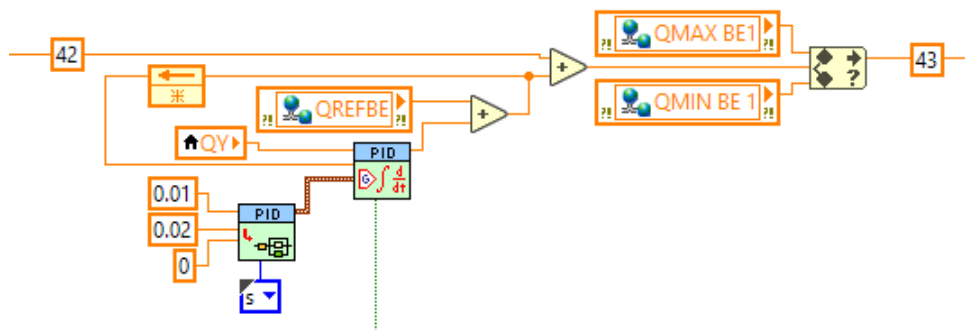
Joonisel 4.16 esitatud muutujate *BE FRR*, *BE RR*, *BE FCR*, *GEN FRR*, *GEN RR*, *PV FCR* ja *WN FCR* alusel kontrollitakse, kas vastava tootmisüksusega on süsteemiteenuse pakkumine aktiveeritud või mitte. Muutujad *FRR OUT BE*, *RR OUT BE*, *FCR OUT BE*, *FRR OUT GEN*, *RR OUT GEN*, *FCR OUT PV* ja *FCR OUT WN* tähistavad vastava tootmisüksuse

ja süsteemiteenuse regulaatori väljundeid, mille võrra muudetakse esialgseid aktiivvõimsusi *PREFBE*, *PREFGEN1*, *PREFPV1* ja *PREFWN1*. Ahelate 38..41 kaudu edastatakse uued aktiivvõimsuste sätteväärtused analoogsignaalide väljastamise funktsiooni.

4.3.4 Liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse reguleerimine ja pingega seotud süsteemiteenused.

Liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse reguleerimist kirjeldati lõputöö jaotises 3.8.3, millel põhinevad ka tööstuskontrolleris koostatud juhtalgoritmid. Lisaks täiendati liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse reguleerimise juhtimissüsteemi nii, et sellega oleks võimalik pakkuda ka kiire reaktiivvoolu sisestuse ja normaaltalitusel pinge reguleerimise süsteemiteenust. Järgnevalt vaadeldakse erinevaid reaktiivvõimsuse reguleerimisviise programmipõhiselt ja seejärel reaktiivvõimsuse reguleerimiseks kasutatud regulaatori sisendite valimist vastavalt eesmärgile.

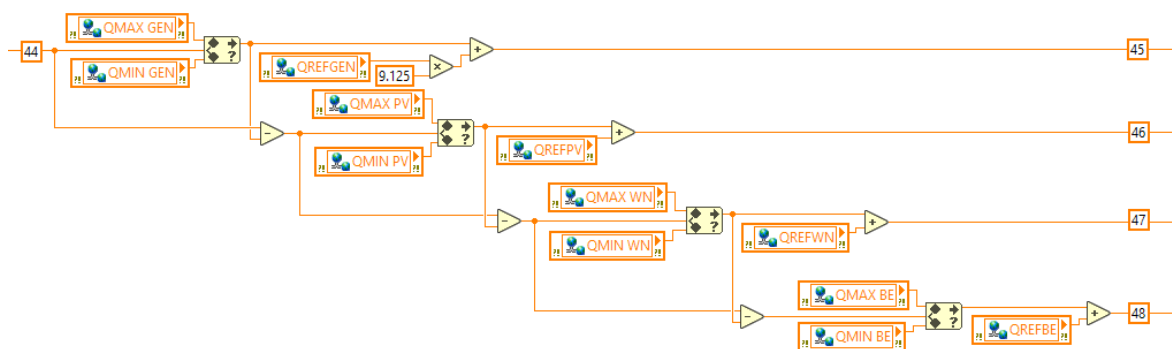
Reaktiivvõimsuse puhul vaadeldi reaalajasimulaatoris koostatud juhtimissüsteemis kolme varianti: võrdelist, järjestikulist ja proportsionaalset reguleerimist. Võrdelise reguleerimise eesmärgiks oli reguleerimise lõpetamisel tagada seis, kus kõikide tootmisüksuste reaktiivvõimsused on võrdsed. Järjestikulise reguleerimise eesmärgiks oli suurendada või vähendada reaktiivvõimsusi järjest. Proportsionaalse reguleerimise eesmärgiks oli reguleerimise lõpetamisel tagada seis, kus iga tootmisüksuse reaktiivvõimsuse protsent on selle maksimaalsest võimalikust reaktiivvõimsusest sama. Nimetatud reguleerimisviiside rakendamiseks koostati LabVIEW-s vastavalt joonistel 4.17, 4.18 ja 4.19 esitatud lülitused.



Joonis 4.17 Reaktiivvõimsuse võrdeline reguleerimine akupanga näitel

Joonisel 4.17 esitatud ahela põhimõte seisneb selles, et akupanga reaktiivvõimsuse sätteväärtust *QREFBE*, ehk akupanga reaktiivvõimsust enne reguleerimise alustamist,

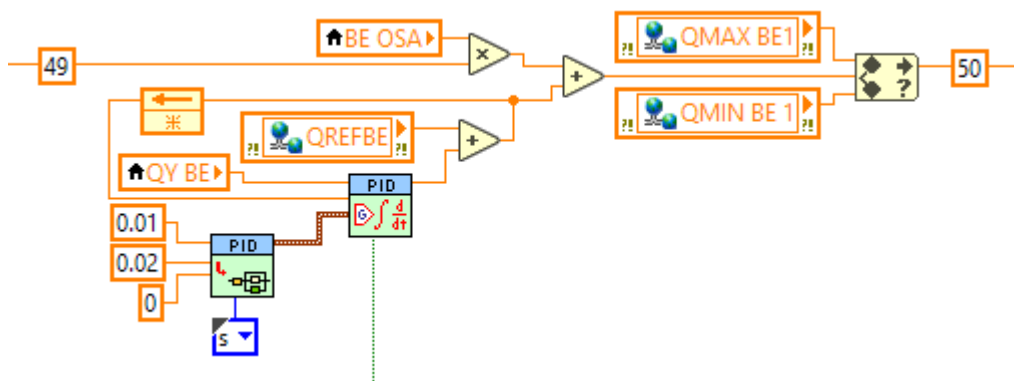
hakatakse muutma nii, et viia kõikide tootmisüksuste reaktiivvõimsuste sätteväärtused võrdseks, mille väärtust joonisel 4.17 tähistab muutuja QY . Muudetud sätteväärtusele lisatakse regulaatori väljund (ahel 42) ja saadud tulemus edastatakse võrdluslülisse. Selles kontrollitakse kas eelnev summa jääb akupanga maksimaalse ja minimaalse võimaliku reaktiivvõimsuse piiridesse. Kui see on tõene, edastatakse eelnev summa muutmata kujul ahela 28 kaudu reaalamulaatorisse. Piiride ületamisel edastatakse piirväärtus, mida ületati. Teiste tootmisüksuste jaoks koostati analoogsed lülitused.



Joonis 4.18 Reaktiivvõimsuse järjestikuline reguleerimine

Joonisel 4.18 on ahelaga 44 tähistatud reaktiivvõimsuse regulaatori väljund, mis edastatakse võrdluslülisse nagu kirjeldatud eelneva reguleerimisviisi juures. Siinkohal ei ole piirväärtusteks enam maksimaalne ja minimaalne võimalik reaktiivvõimsus, vaid reaktiivvõimsus, mille võrra on võimalik vastava tootmisüksuse reaktiivvõimsust tõsta või langetada. Piiraja väljundile liidetakse veel vastava tootmisüksuse reaktiivvõimsuse sätteväärtus ehk reaktiivvõimsus enne reguleerimise alustamist. Generaatori puhul on selleks muutuja $QREFGEN$, mis korrutatakse enne liitmist läbi konstandiga 9,125. Nimetatud konstant tähistab generaatori niminäivvõimsust. Piirväärtuse ületamisel muutuvad piiraja sisend ja väljund erinevateks ning nende vahe edastatakse järgmisele tootmisüksusele. Ahelate 45...48 kaudu edastatakse tootmisüksuste uued reaktiivvõimsuste sätteväärtused analoogsignaale

Joonisel 4.19 esitatud lülitis sarnaneb joonisel 4.17 esitatuga. Erinevuseks on siin muutuja QY_{BE} , mis tähistab akupanga reaktiivvõimsust olukorras, kus kõikide tootmisüksuste reaktiivvõimsused enne reguleerimise alustamist on nende vahel jaotatud proportsionaalselt. Lisaks korrutatakse reaktiivvõimsuse regulaatori väljund (ahel 49) akupanga reaktiivvõimsuse osakaaluga ning lisatakse muudetud sätteväärtusele.



Joonis 4.19 Reaktiivvõimsuse proportsionaalne reguleerimine akupanga näitel

Reaalajasimulaatoris vaadeldi ainult liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse reguleerimist, mida on võimalik juhtimissüsteemi muutmata kasutada ka normaaltalitusel pinge reguleerimiseks reaktiivvõimsuse kaudu. Kiire reaktiivvõimsuse sisestamise süsteemiteenuse pakkumine toimub analoogselt liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse kaudu, seejuures muudetakse regulaatorit kiiremaks. Eesmärgiks on siinkohal ülekandevõrgust vaadeldavasse elektrivõrgu suunduva reaktiivvõimsuse kiire vähendamine või vaadeldavast elektrivõrgust ülekandevõrku suunduva reaktiivvõimsuse kiire suurendamine. Pinge otsene reguleerimine teostati vaadeldava elektrivõrgu alajaama AJ1 (joonis 3.1) teise sektsiooni lattide pingete kaudu. Sellisel juhul on regulaatori sisenditeks pinge sätte- ja mõõteväärtus. Viimasena lisati juhtimissüsteemi võimekus hoida konstantset võimsustegurit liitumispunktis mõõdetud aktiiv- ja reaktiivvõimsuse põhjal. Lisaks muudetakse regulaatori parameetreid vastavalt sellele, mida reguleeritakse. Võimsusteguri reguleerimisel on regulaator kõige tugevatoimelisem, kuna regulaatorite sisendite muutuste vahemikud on kõige väiksemad ja liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse reguleerimisel kõige aeglasem.

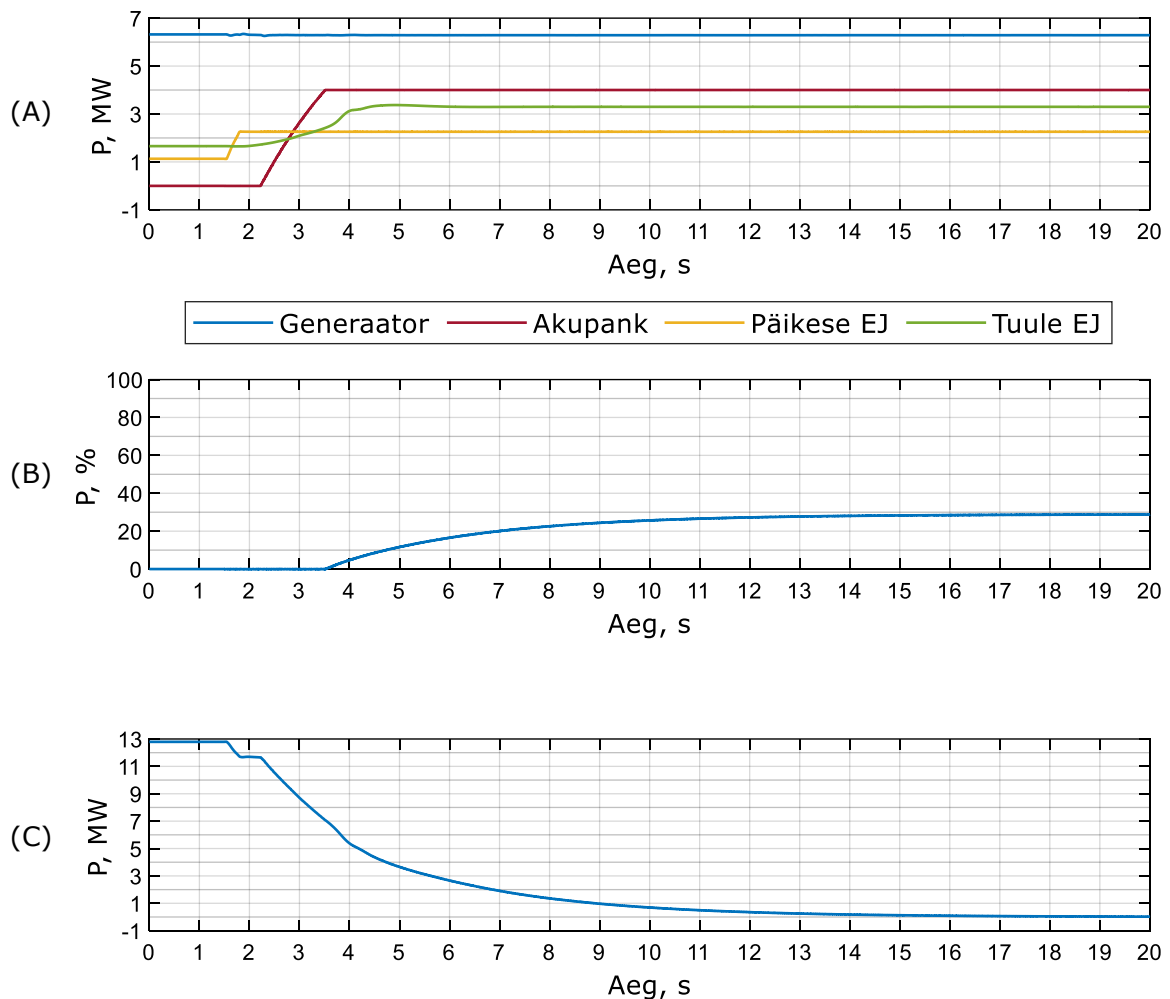
5. KOOSTATUD JUHTALGORITMIDE RAKENDAMISE TULEMUSED

Käesolevas peatükis esitatakse välja töötatud juhtalgoritmide rakendamise tulemused. Lõputöö peamiseks eesmärgiks juhtalgoritmide rakendamine tööstuskontrolleriga. Seetõttu tuuakse reaalajasimulaatoriga teostatud katsetest välja ainult iseloomulikumat katsed, millega näidatakse reaalajasimulaatoril ja tööstuskontrolleril võimalikult sarnaselt koostatud juhtalgoritmide toimimise sarnasusi ja erinevusi. Jaotises 5.1 vaadeldakse liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimise, jaotises 5.2 liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse reguleerimise, jaotises 5.3 saartalitluse, jaotises 5.4 sagedusega seotud süsteemiteenuste ja jaotises 5.5 pingega seotud süsteemiteenuste katsete tulemusi. Jaotises 5.6 esitatakse majandusliku analüüsi tulemused.

5.1 Liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimise katsete tulemused

Liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimist katsetati olukordades, kus enne reguleerimise alustamist sisenes aktiivvõimsus ülekandevõrgust ettevõtte elektrivõrku ja vastupidi. Katsete eesmärgiks on tõestada juhtalgoritmide toime vastavus nende koostamisel paika pandud põhimõtetele. Siinkohal esitatakse ainult tööstuskontrolleriga teostatud katsete tulemused.

Esimesel katsel sisenes enne reguleerimise alustamist aktiivvõimsus ülekandevõrgust vaadeldavasse elektrivõrku. Katse käigus oli eesmärgiks viia sisenev võimsus 12,8 MW nulli. Katse alguses töötas sünkroongeneraator maksimaalse võimaliku aktiivvõimsusega, päikese- ja tuuleelektrijaam olid 50% mahakoormatud ning akupanga aktiivvõimsus oli 0 MW. Katse eesmärgiks on näidata tootmisüksuste reguleerimise õiget järjekorda ning seda, et aktiivvõimsuse piire ei ületata ja juba maksimaalse koormusega töötava tootmisüksuse aktiivvõimsust ei muudeta. Katse tulemused on esitatud joonisel 5.1.

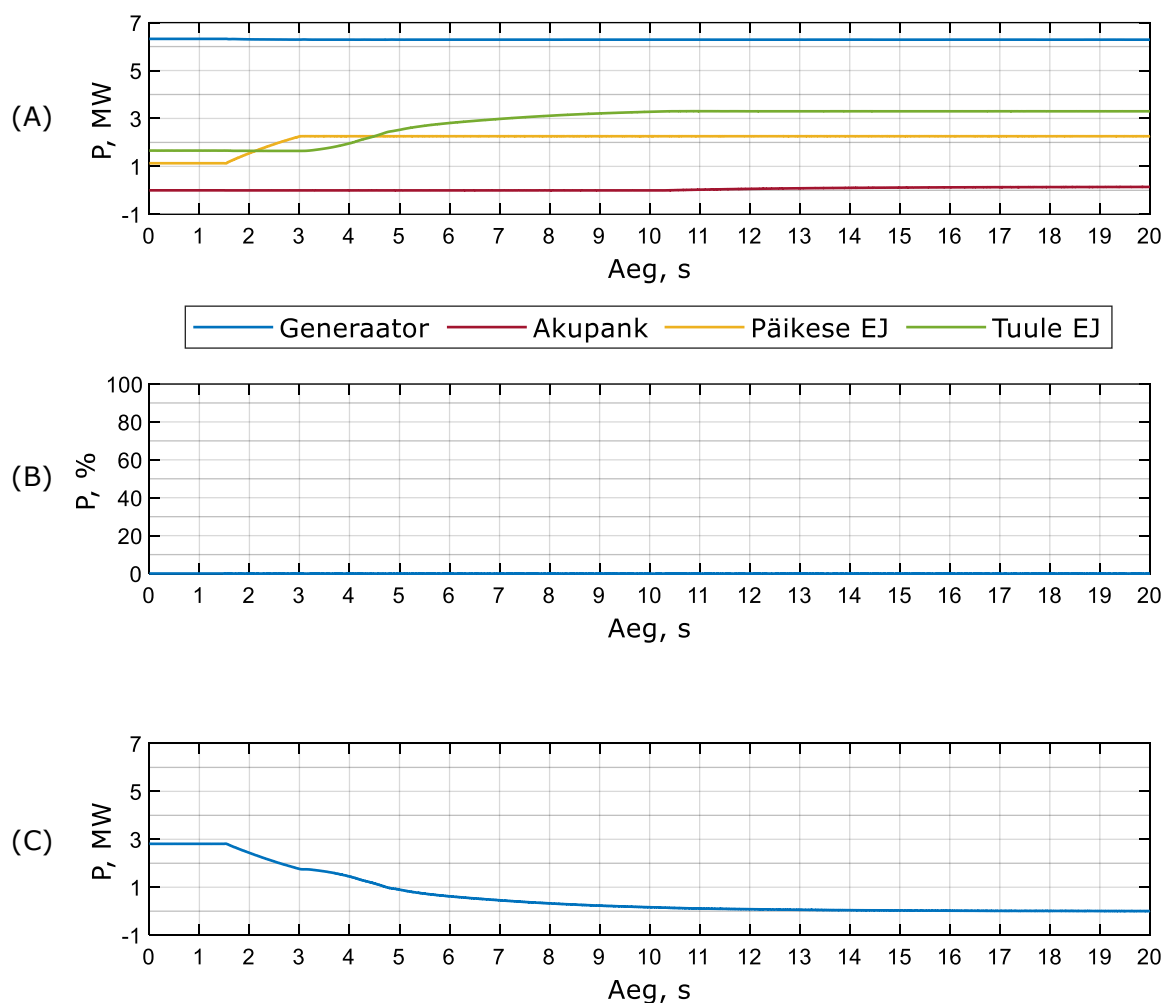


Joonis 5.1 Liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimine kui ülekandevõrgust siseneb aktiivvõimsus ettevõtte elektrivõrku. A - tootmisüksuste aktiivvõimsused, B - aktiivkoormuse vähendamise protsent, C - liitumispunkti läbiv aktiivvõimsus

Reguleerimist alustati ajahetkel 1,5 sekundit. Joonisel 5.1 esitatud graafikult A on näha, et ajavahemikus 1,5...1,8 sekundit tõstetakse päikeseelektrijaama aktiivvõimsust. Järgnevalt tõsteti ajavahemikus 1,8...4,0 sekundit tuuleelektrijaama aktiivvõimsust. Akupanga aktiivvõimsust tõstetakse ajavahemikus 2,2...3,5 sekundit, mis kattub tuuleelektrijaama reguleerimisajaga. Seda põhjustab asjaolu, et liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse regulaator on kiirem kui tuuleelektrijaama aktiivvõimsuse regulaator. Lisaks on graafikult A näha, et sünkroongeneraatori aktiivvõimsust ei muudeta, sest see töötab enne reguleerimist maksimaalse võimaliku koormusega. Graafikult B on näha, et aktiivkoormust hakatakse vähendama ajahetkel 3.5 sekundit, kui akupank saavutas enda maksimaalse võimsuse. Joonisel 5.1 esitatud graafikult C selgub, et liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse sätevärtus 0 MW saavutatakse ajahetkel 19 sekundit. Ajavahemikus 1,8...2,2 sekundit põhjustab tuuleelektrijaama aktiivvõimsuse reguleerimise aeglus viite liitumispunkti läbivas aktiivvõimsuses. Katse tulemustest on leiti, et reguleerimist alustatakse õiges järjekorras, kuid akupanga aktiivvõimsust hakati reguleerima enne kui tuuleelektrijaam saavutas maksimaalse võimsuse. Põhjuseks on

siin asjaolu, et liitumispunkti läbivat aktiivvõimsust reguleeritakse suures vahemikus. See tähendab, et vastava regulaatori väljund muutub kiiresti ja seega tuleb tuuleelektrijaama reguleerimise aeglus tugevamalt esile.

Järgnevalt teostati katse, kus liitumispunkti läbivat aktiivvõimsust reguleeriti eelnevast katsest väiksemas vahemikus. Sellega kontrolliti, et tuuleelektrijaama aktiivvõimsuse piirväärtuse läheduses ei hakata akupanga aktiivvõimsust reguleerima liiga vara. Kirjeldatud katse tulemused on esitatud joonisel 5.2.

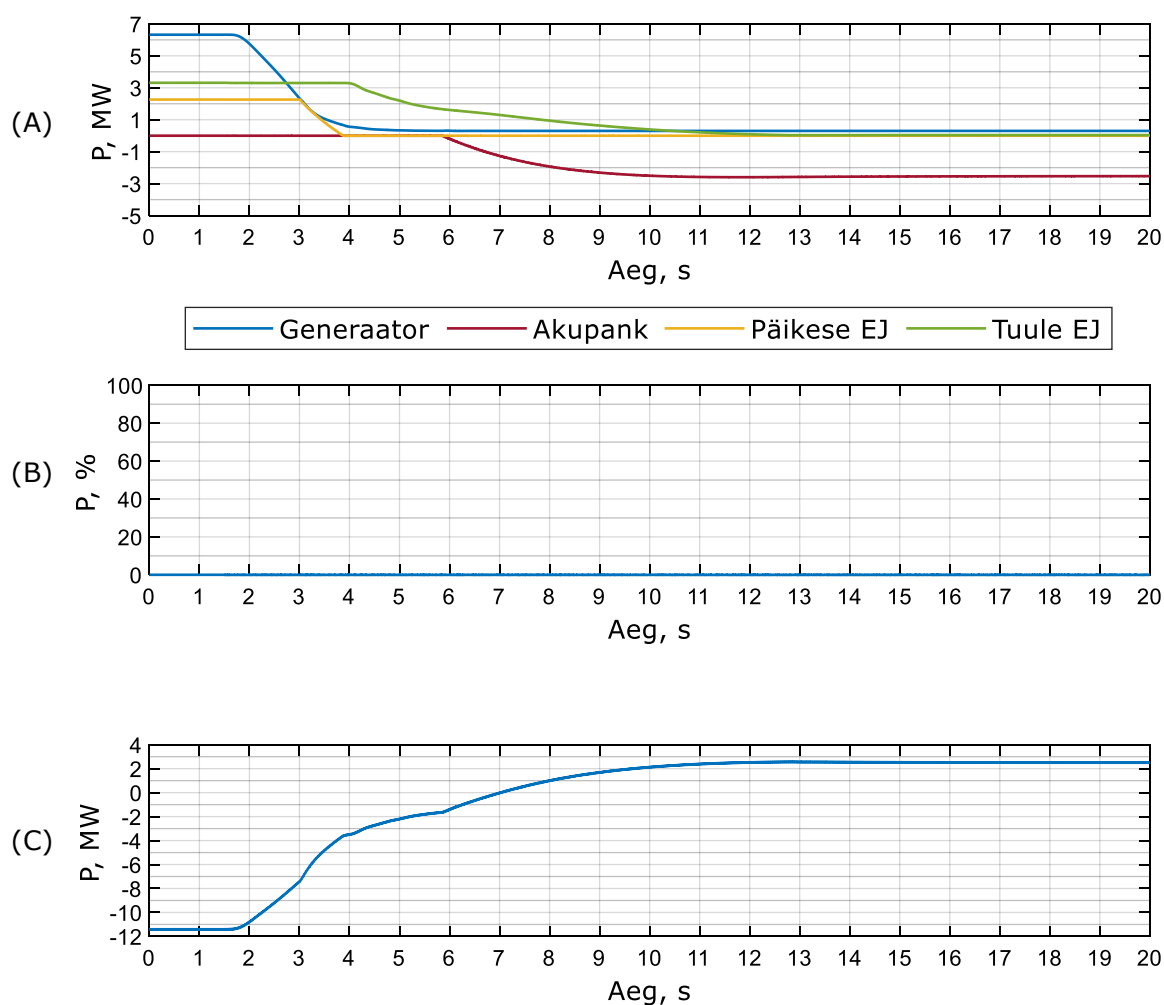


Joonis 5.2 Liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimine kui ülekandevõrgust siseneb aktiivvõimsus ettevõtte elektrivõrku. A - tootmisüksuste aktiivvõimsused, B - aktiivkoormuse vähendamise protsent, C - liitumispunkti läbiv aktiivvõimsus

Joonisel 5.2 esitatud graafikult A on näha, et ajavahemikus 1,5...3,0 sekundit tõstetakse päikeseelektrijaama aktiivvõimsust, ajavahemikus 3,0...10,2 sekundit tõstetakse tuuleelektrijaama aktiivvõimsust ja ajavahemikus 10,2...16,2 sekundit akupanga aktiivvõimsust. Katse tulemustest selgub, et väiksemas reguleerimisulatuses muutub vastava regulaatori väljund aeglasemalt kui tuuleelektrijaam on võimeline aktiivvõimsust tõstma. Katsete tulemustest saab järeldada, et reguleerimise järjekord

aktiivvõimsuste tõstmisel vastab eelnevalt paika pandud põhimõtetele ja tuuleelektrijaamale järgnevat akupanka ja koormust hakatakse reguleerima enne tuuleelektrijaama maksimaalse võimsuse saavutamist ainult tingimustes, kus neid on ka realselt vaja reguleerida.

Kolmandal katsel oli reguleerimise eesmärgiks ettevõtte elektrivõrgust ülekandevõrku väljuv aktiivvõimsus viia nulli ja seejärel suurendada ülekandevõrgust vaadeldavasse elektrivõrku sisenevat aktiivvõimsust 2,5 MW-ni. Reguleerimise eesmärk valiti nii, et näha oleks kõikide tootmisüksuste aktiivvõimsuste muutused. Katse tulemused on esitatud joonisel 5.3.



Joonis 5.3 Liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimine kui ettevõtte elektrivõrgust väljub aktiivvõimsus ülekandevõrku. A - tootmisüksuste aktiivvõimsused, B - aktiivkoormuse vähendamise protsent, C - liitumispunkti läbiv aktiivvõimsus

Joonisel 5.3 esitatud graafikult A on näha, et ajahetkel 1,7 sekundit hakatakse vähendada sünkroongeneraatori aktiivvõimsust ja selle minimaalne aktiivvõimsus saavutatakse ajahetkel 6,0 sekundit. Reguleerimise alghetkel tekkiv viide on põhjustatud generaatori juhtimissüsteemi omatoimeajast. Teisena vähendatakse

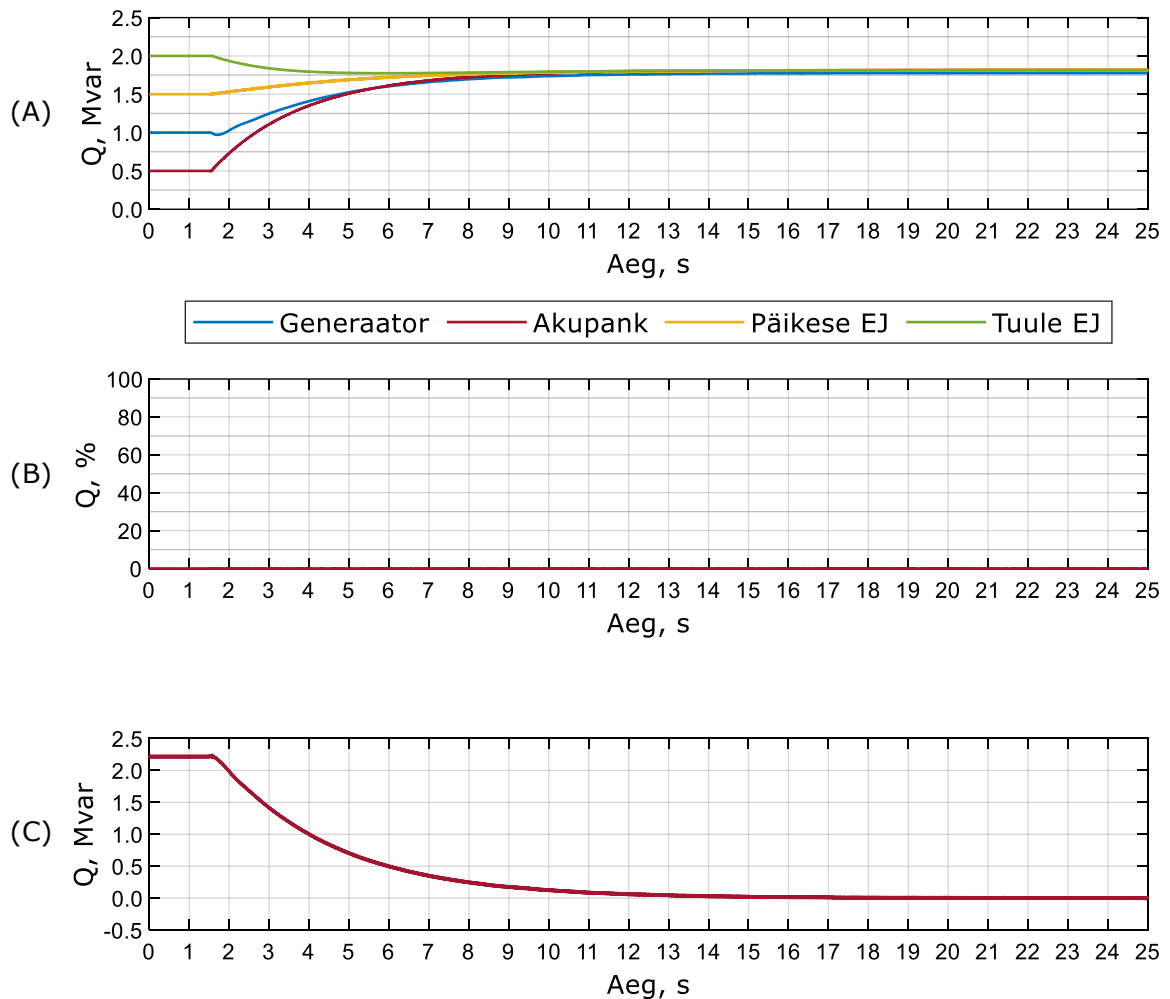
ajavahemikus 3,0...3,9 sekundit päikeseelektrijaama aktiivvõimsust. Kolmandana vähendatakse ajavahemikus 4,0...12,5 sekundit tuuleelektrijaama aktiivvõimsust. Viimasena suurendatakse ajavahemikus 6,0...11,0 sekundit akupanga tarbimissuunalist aktiivvõimsust. Katse käigus aktiivkoormust ei reguleeritud. Graafikult C selgub, et liitumispunktis saavutatakse aktiivvõimsuse sätteväärtus 2,5 MW ligikaudu 12,5 sekundiga. Ka selle katse puhul leiti, et tootmisüksuste aktiivvõimsuste reguleerimised kattuvad omavahel.

Liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimise katsete käigus näidati, et tootmisüksuste reguleerimise järjekord on nii aktiivvõimsuse tõstmisel kui ka langetamisel õige. Reguleerimiste ajalist kattuvust on võimalik vähendada liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse regulaatori aeglasemaks muutmisega. Samas teostati katsed nii, et näha oleks kõikide reguleerivate üksuste aktiivvõimsuste muutused ja eeldatavasti sellises mahus aktiivvõimsuse reguleerimist realselt ei teostata, mis tähendab, nagu näidatud teisel katsel (joonis 5.2), et ajalist kattuvust suure tõenäosusega ei esine. Joonistel 5.1...5.3 esitatud graafikutelt C selgus, et liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimise kiirust mõjutavad oluliselt reguleerimisvahemik ja tootmisüksuste reguleerimiskiirused, samas saavutati igal katsel lõpuks õige liitumispunkti läbiv aktiivvõimsus, mis vastas sätteväärtusele. Katsete käigus ei ületatud summaarseid maksimaalseid ja minimaalseid reguleerimisvahemikke, mistõttu saavutati katsete käigus reguleerimise eesmärgid. Samas selgus katsete tulemustest, et aktiivvõimsuse piirajad töötavad õigesti ja seega jääks piiratuks ka regulaatori töö.

5.2 Liitumispunktis reaktiivvõimsuse reguleerimise katsete tulemused

Liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse reguleerimiseks teostati katsed kõigi kolme koostatud reguleerimisviisi puhul, milleks olid võrdeline, järjestikuline ja proportsionaalne reguleerimine. Järgnevalt vaadeldakse nimetatud reguleerimisviisidega teostatud katsete tulemusi. Kõik katsed teostati tööstuskontrolleri juhtalgoritmidega. Ülekandevõrgust ettevõtte elektrivõrku siseneva reaktiivvõimsuse võrdelisel reguleerimisel tuuakse välja ka reaajasimulaatori juhtalgoritmidega teostatud katse tulemused. Selle eesmärgiks on võrrelda tööstuskontrolleri ja reaajasimulaatori juhtimissüsteemide toime võimalikke erinevusi ja sarnasusi aeglaste protsesside korral.

Esimesel katsel oli eesmärgiks reaktiivvõimsuse võrdelise jaotamisega enne reguleerimise alustamist ülekandevõrgust ettevõtte elektrivõrku sisenev reaktiivvõimsus viia nulliks ehk tõsta tootmisüksuste summaarset reaktiivvõimsust. Elektrivõrgu reaktiivkoormus oli seejuures maksimaalne. Tööstuskontrolleri juhtalgoritmiga teostatud katse tulemused on esitatud joonisel 5.4 ja reaalarajasimulaatori juhtalgoritmiga teostatud katse tulemused joonisel 5.5. Mõlemate juhtalgoritmidega teostatud katsete algseisud olid seejuures samad.

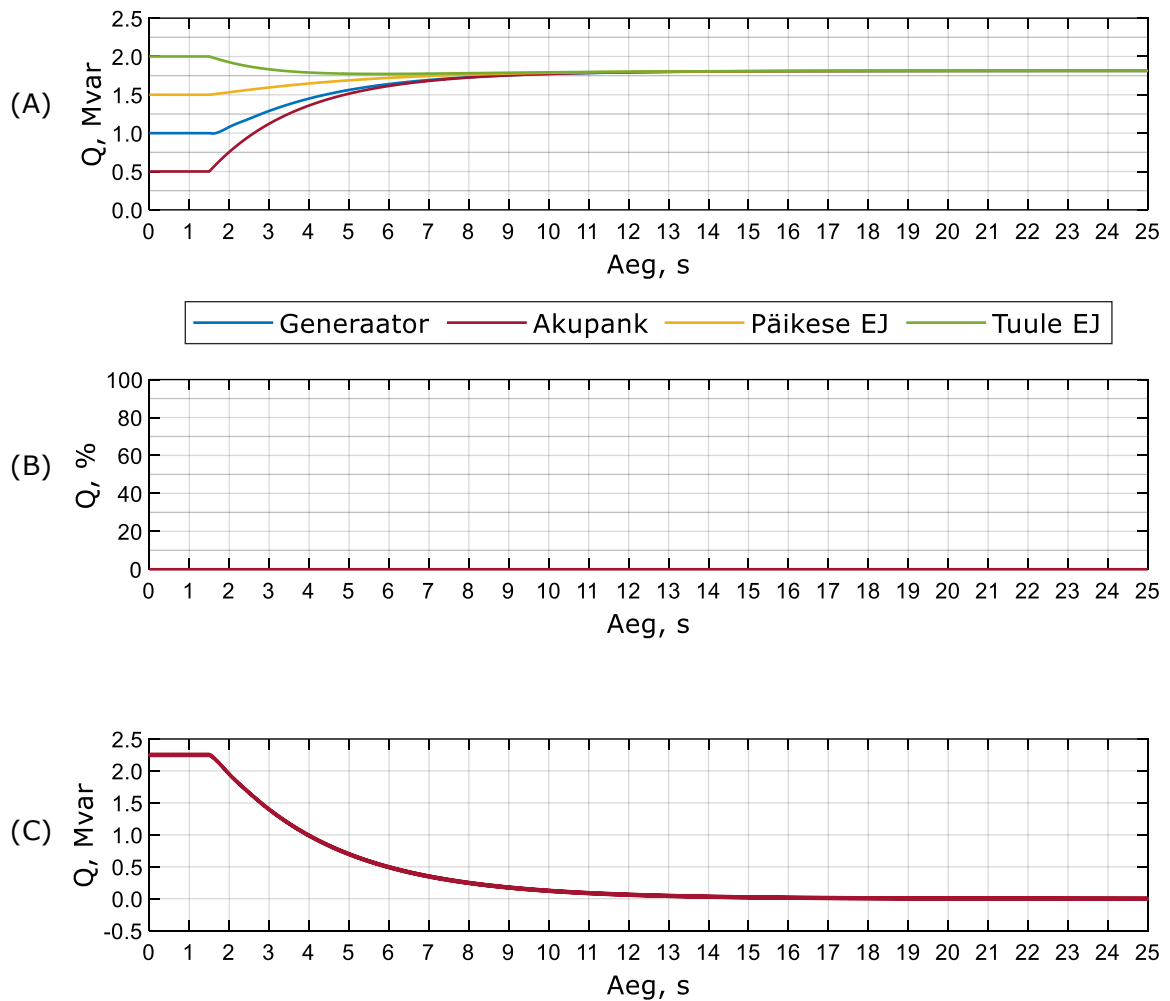


Joonis 5.4 Liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse võrdeline reguleerimine tööstuskontrolleri juhtalgoritmiga kui ülekandevõrgust siseneb reaktiivvõimsus ettevõtte elektrivõrku. A - tootmisüksuste reaktiivvõimsused, B - reaktiivvõimsuse vähendamise protsent, C - liitumispunkti läbiv reaktiivvõimsus

Joonisel 5.4 esitatud graafikult A on näha, et katsetingimuste raskendamiseks on enne reguleerimise alustamist tootmisüksuste reaktiivvõimsused ebavõrdsed. Seejuures ei määratud neid mingite kriteeriumide alusel. Juhtalgoritm koostati eesmärgiga, et tootmisüksuste reaktiivvõimsuste võrdsustamine ei põhjustaks viiteid liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse reguleerimises. Juhtalgoritmi õigsust kinnitavad joonisel 5.4 esitatud graafikud A ja C. Graafikult C on näha, et liitumispunkti läbiv reaktiivvõimsus

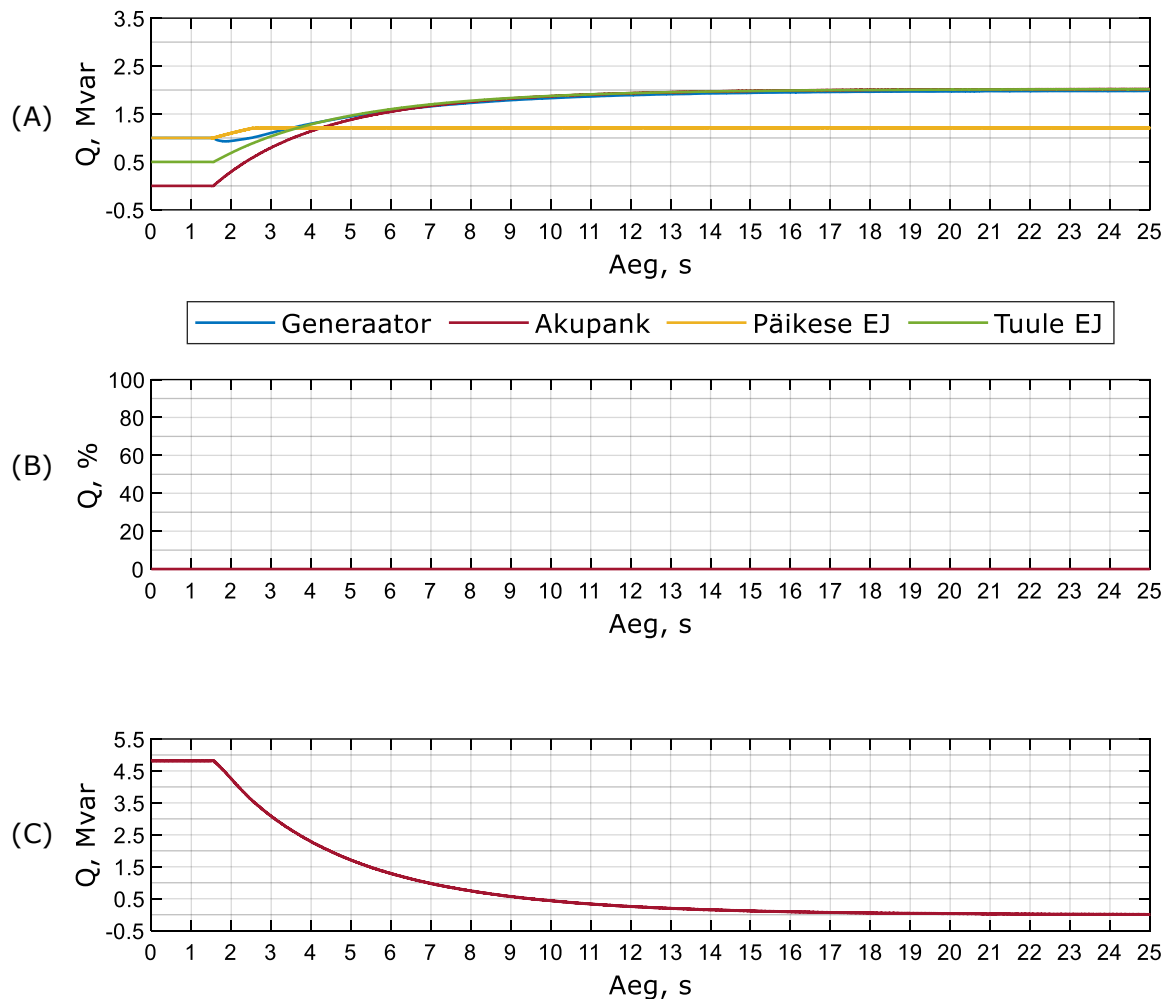
hakkab langema ajahetkel 1,5 sekundit ehk hetkel kui alustati reguleerimisprotsessi ja eesmärk saab täidetud ligikaudu ajahetkel 15 sekundit. Graafikult A selgub, et iga tootmisüksuse reaktiivvõimsuse reguleerimine toimub sujuvalt ehk tuuleelektrijaama näitel ei vähendata selle algset reaktiivvõimsust nii palju, et seda oleks hiljem vaja uuesti tõsta. Sujuva reguleerimise saavutamiseks on oluline, et integraalsed regulaatorid, mis võrdsustavad tootmisüksuste reaktiivvõimsusi (joonised 3.12 ja 4.17), ei oleks liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse regulaatorist palju kiiremad. Vastasel juhul saavutatakse küll võrdne lõppseis, kuid reguleerimine ei ole enam sujuv. Lisaks on graafikult C näha, et erinevalt liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimisest on liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse reguleerimine on sujuv. Põhjus on selles, et kasutatakse võrdelist reguleerimist ja ühe tootmisüksuse reaktiivvõimsuse regulaatori mõju liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse muutuse kiirusele ei ole nii suur. Graafikult B näha, et reaktiivkoormuse vähendamist ei toimu ehk tootmisüksused on võimelised katma elektrivõrgu reaktiivkoormuse ja reaktiivvõimsuskaod.

Võrreldes joonistel 5.4 ja 5.5 esitatud graafikuid leiti, et tööstuskontrolleri ja reaalarajasimulaatori juhtalgoritmide toime aeglaste protsesside korral oluliselt ei erine. See tuleneb asjaolust, et sideviited reaalarajasimulaatori ja tööstuskontrolleri vahel on lühikesed. Suuremad erinevused võivad esile tulla juhul kui sideviide muutub pikemaks. Sideviite suurenemisel teatud ajani oleks tööstuskontrolleriga teostatud katsete tulemustes esimesena näha reguleerimise alustamise ajaliskahet võrreldes reaalarajasimulaatori juhtimissüsteemiga. Samas võib reguleerimine siiski toimuda sujuvalt. Sideviidete pikenedes veelgi võib tekkida olukord, kus liitumispunkti läbivas reaktiivvõimsuses ei saavutata konstantset lõppseisu. Selle põhjustab asjaolu, et liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse mõõteväärtused jõuavad kontrollerisse teatud hilinemisega, mille jooksul võivad regulaatorite väljundid liigselt suurenedes või väheneda. Sellest tulenevalt on oluline sideühenduste kiirus kontrolleri ja praegusel juhul reaalarajasimulaatori vahel. Joonistel 5.4 ja 5.5 esitatud katsete tulemused on eristatavad graafikutel A esitatud sünkroongeneraatori reaktiivvõimsuse alusel. Tööstuskontrolleriga teostatud katse puhul esineb reguleerimise algajal sünkroongeneraatori reaktiivvõimsuses väike lohk, mille põhjustab analoogühenduste kasutamine kuna generaatori VAR kontrolleris lülitatakse reaktiivvõimsuse sätteväärtus reaalarajasimulaatorist saadud väärtuselt ümber tööstuskontrollerist saadud sätteväärtusele. Katsetulemustest saab lisaks järeldada, et reaalarajasimulaatori integraalsete regulaatorite parameetrite teisendamine tööstuskontrolleris kasutatavate PID regulaatorite parameetriteks teostati õigesti.



Joonis 5.5 Liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse võrdeline reguleerimine reaajasimulaatori juhtalgoritmiga kui ülekandevõrgust siseneb reaktiivvõimsus ettevõtte elektrivõrku: A - tootmisüksuste reaktiivvõimsused, B - reaktiivkoormuse vähendamise protsent, C - liitumispunkti läbiv reaktiivvõimsus

Teisel katsel oli eesmärgiks testida võrdelise jaotamise juhtalgoritmide tööd olukorras, kui reguleerimise ajal saavutatakse ühe tootmisüksuse reaktiivvõimsuse piir. Liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse regulaator ja võrdelise jaotamise juhtalgoritmide koostati eesmärgiga, et ülejäänud tootmisüksuste reaktiivvõimsused oleksid reguleerimise lõpus siiski võrdsed. Katse algseis määrati nii, et päikeseelektrijaama aktiivvõimsus oleks lähedane selle pingemuunduri niminäivvõimsusele, kuid, et siiski säiliks selle teatud reaktiivvõimsuse reguleerimise võime. Teiste tootmisüksuste reaktiivvõimsuseid ei määratud mingite kindlate kriteeriumide alusel. Kirjeldatud katse teostati tööstuskontrolleri juhtalgoritmidega. Katse tulemused on esitatud joonisel 5.6.

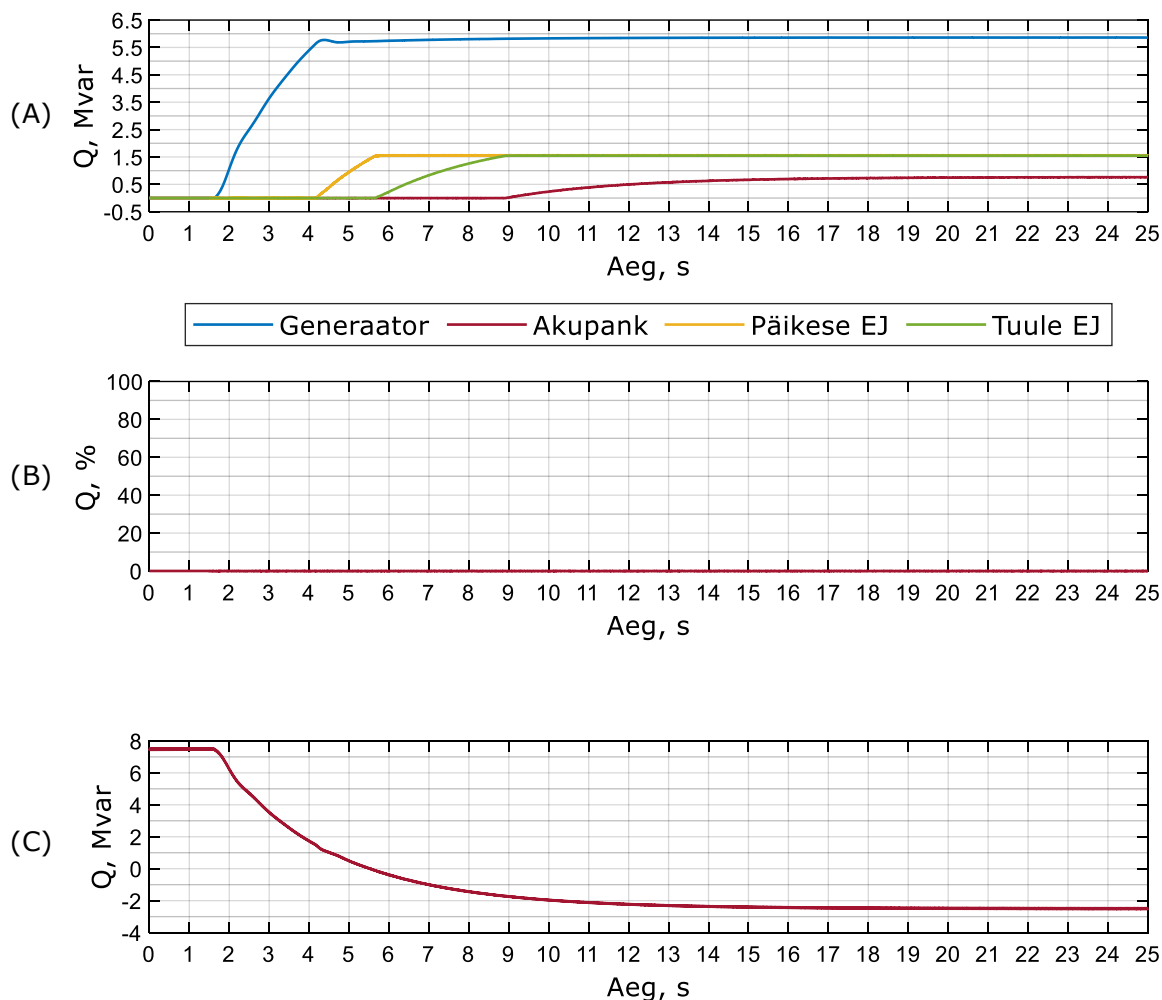


Joonis 5.6 Liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse võrdeline reguleerimine kui reguleerimisel saavutatakse ühe tootmisüksuse reaktiivvõimsuse piir. A – tootmisüksuste reaktiivvõimsused, B – koormuse vähendamise protsent, C – liitumispunkti läbiv reaktiivvõimsus

Reguleerimist alustati ajahetkel 1,5 sekundit. Joonisel 5.6 esitatud graafikult A selgub, et päikeseelektrijaama maksimaalse reaktiivvõimsuse saavutamisel ligikaudu ajahetkel 2,5 sekundit jääb see edasiselt konstantseks. Lisaks selgub graafikult A, et kuigi päikeseelektrijaama reaktiivvõimsust enam ei tõsteta saavutavad teised tootmisüksused ligikaudu ajahetkel 14 sekundit võrdse seisundi. Katse tulemustest saab järeldada, et ühe tootmisüksuse reaktiivvõimsuse piiri saavutamine ei mõjuta teiste tootmisüksuste võrdse lõppseisundi saavutamist ehk juhtalgoritmid töötavad õigesti.

Kolmandal katsel oli eesmärgiks järjestikulise reguleerimisega vähendada ülekandevõrgust ettevõtte elektrivõrku sisenev reaktiivvõimsus nullini ja seejärel suunata vaadeldavast elektrivõrgust 2,5 Mvar reaktiivvõimsust ülekandevõrku. Selline reaktiivvõimsuse sätteväärtus valiti, et oleks näha kõikide tootmisüksuste reaktiivvõimsuste reguleerimist. Eelnevalt oli reguleerimise järjekorraks määratud: sünkroongeneraator, päikeseelektrijaam, tuuleelektrijaam ja akupank. Reaktiivvõimsuse piiride saavutamiseks määrati eelnevalt nimetatud tootmisüksuste

aktiivvõimsusteks vastavalt 7,0, 4,75, 4,75 ja 0 MW ehk kõik tootmisüksused peale akupanga töötasid maksimaalse aktiivvõimsuse lähedal. Kirjeldatud katse tulemused on esitatud joonisel 5.7.

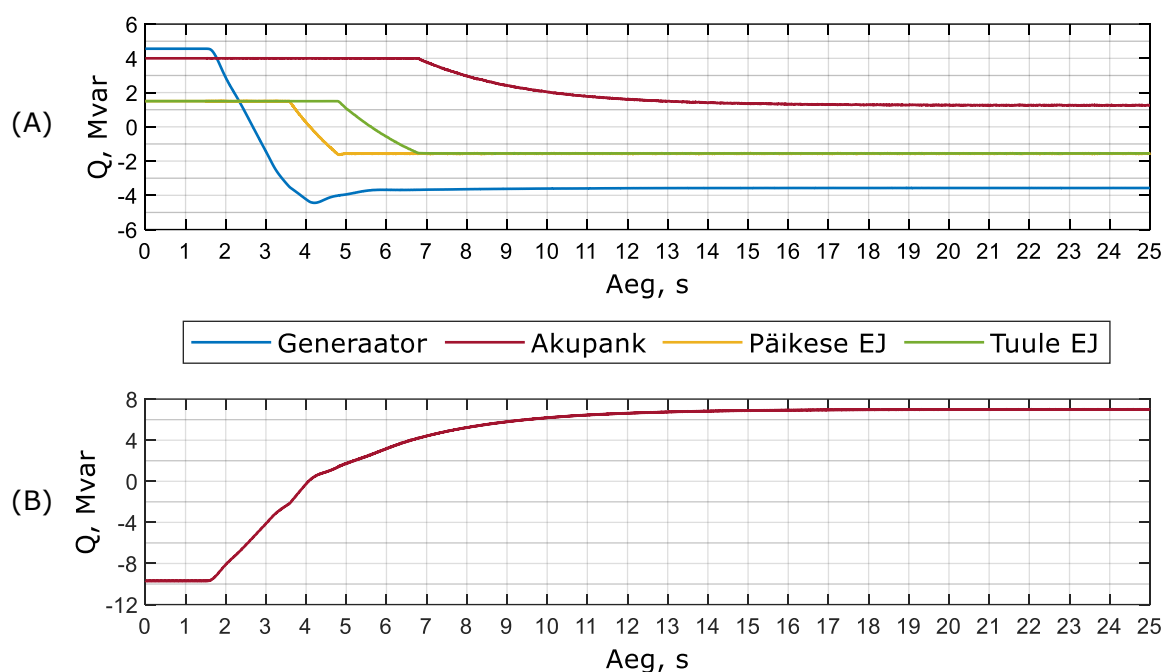


Joonis 5.7 Liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse järjestikuline reguleerimine kui ülekandevõrgust siseneb reaktiivvõimsus ettevõtte elektrivõrku. A - tootmisüksuste reaktiivvõimsused, B - reaktiivkoormuse vähendamise protsent, C - liitumispunkti läbiv reaktiivvõimsus

Joonisel 5.7 esitatud graafikult A on näha, et ajavahemikus ligikaudu 1,5...4,2 sekundit tõstetakse sünkroongeneraatori reaktiivvõimsust. Teisena tõstetakse ajavahemikus 4,2...5,8 sekundit päikeseelektrijaama reaktiivvõimsust. Kolmandana tõstetakse ajavahemikus 4,8...8,8 sekundit tuuleelektrijaama reaktiivvõimsust ning viimasena ajavahemikus 8,8...20,0 sekundit akupanga reaktiivvõimsust. Graafikult C leiti, et ajahetkel 20 sekundit saavutatakse ka liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse sätteväärtus. Erinevalt liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimisest ei kattu tootmisüksuste reaktiivvõimsuste reguleerimised ajaliselt, kuigi mõlemad regulaatorid olid seadistatud sama kiireks. Põhjus on siin selles, et tootmisüksuste reaktiivvõimsuse regulaatorid on kiiremad kui liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse regulaator. Aktiivvõimsuse puhul põhjustas reguleerimise ajalist kattuvust tuuleelektrijaama

aktiivvõimsus regulaatori aeglus. Lisaks on joonisel 5.7 esitatud graafikult B näha, et kuigi tootmisüksused, välja arvatud akupank, töötasid maksimaalsete aktiivvõimsuste lähedal ja elektrivõrgu summaarne koormus oli maksimaalne, ei ole vaja reaktiivkoormust vähendada.

Neljanda katse eesmärgiks oli järjestikulise reguleerimisega vähendada ettevõtte elektrivõrgust ülekandevõrku väljuv reaktiivvõimsus nullini ja seejärel suurendada ülekandevõrgust ettevõtte elektrivõrku sisenevat reaktiivvõimsus 7 Mvar-ni. Katse algseis määrati nii, et oleks näha kõikide tootmisüksuste reaktiivvõimsuste reguleerimine. Reguleerimise järjekord oli siinkohal sama eelneva katsega ja samuti olid samad tootmisüksuste aktiivvõimsused. Kirjeldatud katse tulemused on esitatud joonisel 5.8.



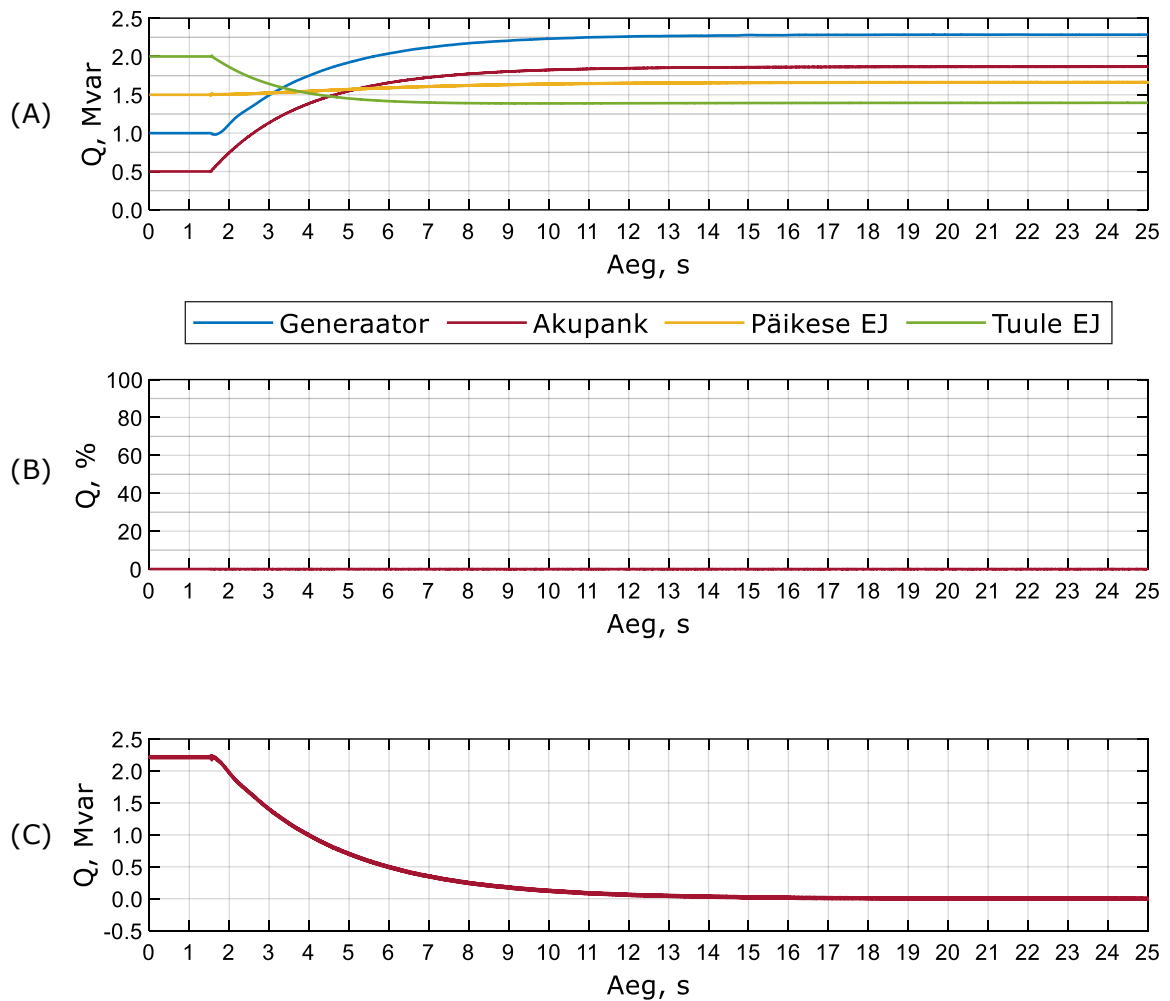
Joonis 5.8 Liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse järjestikuline reguleerimine kui ettevõtte elektrivõrgust väljub reaktiivvõimsus ülekandevõrku. A - tootmisüksuste reaktiivvõimsused, B - liitumispunkti läbiv reaktiivvõimsus

Joonisel 5.8 esitatud graafikult A on näha, et ajavahemikus 1,5...3,6 sekundit vähendatakse esmalt sünkroongeneraatori tootmissuunalist reaktiivvõimsust ja seejärel suurendatakse selle tarbimissuunalist reaktiivvõimsust. Teisena reguleeritakse ajavahemikus 3,6...4,8 sekundit päikeseelektrijaama reaktiivvõimsust. Ajahetkel 3,6 sekundit saavutatakse küll sünkroongeneraatori reaktiivvõimsuse piir, mistõttu edasi reguleeritakse päikeseelektrijaama reaktiivvõimsust, kuid siinkohal tekitab generaatori reaktiivvõimsuse regulaator alavõnke, mis stabiliseerub ligikaudu kahe sekundiga. Alavõnke põhjustab siinkohal sünkroongeneraatori reaktiivvõimsuse

regulaator, mitte liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse regulaator. Kolmandana reguleeritakse ajavahemikus 4,8...6,7 sekundit tuuleelektrijaama reaktiivvõimsust ning viimasena akupanga reaktiivvõimsust alates ajahetkest 6,8 sekundit. Joonisel 5.8 esitatud graafikult B on näha, et liitumispunktis saavutatakse reaktiivvõimsuse sätteväärtus ligikaudu ajahetkel 18 sekundit. Graafikult A selgub, et sünkroongeneraator ning päikese- ja tuuleelektrijaam tarvivad reaktiivvõimsust, kuid akupank toodab reaktiivvõimsust.

Eelnevalt kirjeldatud katsest tuleneb ka käesolevas lõputöös koostatud reaktiivvõimsuse järjestikulise reguleerimismetoodika puudus, ühed tootmisüksused toodavad teiste tootmisüksuste samal ajal tarbitava reaktiivvõimsuse. Reaktiivvõimsuse järjestikulise reguleerimise meetodikat saaks täiendada selliselt, et esimesena viiakse tootmisüksuste reaktiivvõimsused järjestikuliselt nulli ja alles seejärel suurendatakse kas tootmis- või tarbimissuunalist reaktiivvõimsust edasi järjestikuliselt. Seega sobib praegu koostatud meetod eelkõige aktiivvõimsuse järjestikuliseks reguleerimiseks, sest ainus tootmisüksus, mis saab aktiivvõimsust tarbida, on akupank ja seda kasutati tootmisüksustest viimasena. Võrdelise ja proportsionaalse reguleerimisega kirjeldatud olukorda ei teki, kuna liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse regulaator on kõigile tootmisüksustele ühine ja selle väljundi märgi vahetuse korral muutuvad ka kõikide tootmisüksuste reaktiivvõimsuste sisenditesse jõudvad reaktiivvõimsused.

Viiendal katsel oli eesmärgiks proportsionaalse reguleerimisega viia ülekandevõrgust ettevõtte elektrivõrku sisenev reaktiivvõimsus 2,2 Mvar viia 0 Mvar-ni. Sünkroongeneraatori aktiivvõimsus oli enne katse alustamist 6,32 MW, päikeseelektrijaama aktiivvõimsus oli 2,26 MW, tuuleelektrijaama aktiivvõimsus oli 3,31 MW ja akupanga aktiivvõimsus oli 0 MW. Sünkroongeneraatori maksimaalne reaktiivvõimsus saadi juhtimissüsteemis teostatud automaatsetest arvutustest, mida kirjeldati käesoleva lõputöö jaotises 3.8.1. Akupanga ning päikese- ja tuuleelektrijaama maksimaalsed reaktiivvõimsused arvutati nende PQ karakteristikute alusel. Sünkroongeneraatori maksimaalne reaktiivvõimsus oli 6,32 Mvar, päikeseelektrijaama maksimaalne reaktiivvõimsus oli 4,46 Mvar, tuuleelektrijaama maksimaalne reaktiivvõimsus oli 3,75 Mvar ja akupanga maksimaalne reaktiivvõimsus oli 5 Mvar. Tootmisüksuste reaktiivvõimsused enne reguleerimise alustamist valiti nii, et tagatud oleks osade tootmisüksuste reaktiivvõimsuse tõstmine ja osade tootmisüksuste reaktiivvõimsuste langetamine. Kirjeldatud katse tulemused on esitatud joonisel 5.9.



Joonis 5.9 Liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse järjestikuline reguleerimine kui ülekandevõrgust siseneb reaktiivvõimsus ettevõtte elektrivõrku. A - tootmisüksuste reaktiivvõimsused, B – reaktiivkoormuse vähendamise protsent, C - liitumispunkti läbiv reaktiivvõimsus

Joonisel 5.9 esitatud graafikult C on näha, et sarnaselt reaktiivvõimsuse võrdelise reguleerimisega ei põhjusta ka proportsionaalne reguleerimine liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse reguleerimises ajalisi viiteid ning reguleerimise eesmärk saab täidetud ligikaudu ajahetkel 16 sekundit. Liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse reguleerimise katsetest esimene (joonis 5.4) teostati samadel tingimustel praeguse katsega ja seal saavutati reguleerimise eesmärk ligikaudu ajahetkel 15 sekundit. Erinevust võib põhjustada liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse 0 Mvar ehk eesmärgi täitmise ajahetke määramine graafikutelt. Sellest tulenevalt võib mõlemad reguleerimisviisi ajalise kestuse lugeda ligikaudu võrdseks. Graafikult A selgub, et reguleerimise eesmärgi täitmise hetkel on kõige suurem sünkroongeneraatori reaktiivvõimsus, millele järgnevad akupanga, päikeseelektrijaama ja tuuleelektrijaama reaktiivvõimsused. Arvestades vastavate tootmisüksuste maksimaalsete reaktiivvõimsustega, on tegu õige järjekorraga. Sünkroongeneraatori reaktiivvõimsus oli reguleerimise eesmärgi täitmisel 2,29 Mvar, akupanga reaktiivvõimsus oli 1,87 Mvar, päikeseelektrijaama reaktiivvõimsus oli 1,66 Mvar ja tuuleelektrijaama reaktiivvõimsus oli 1,40 Mvar. Sellest

tulenevalt tootis sünkroongeneraator 36,8%, akupank 37,4%, päikeseelektrijaam 37,2% ja tuuleelektrijaam 37,3% vastavatest maksimaalsetest reaktiivvõimsustest. Arvutatud protsentidest on näha, et akupanga, päikese- ja tuuleelektrijaama reaktiivvõimsused erinevad maksimaalselt 0,2% võrra ning sünkroongeneraatori reaktiivvõimsus teistest maksimaalselt 0,6% võrra. Põhjus selles, et sünkroongeneraatori reaktiivvõimsust reguleeritakse suhtelistes ühikutes, samas kui teiste tootmisüksuste reaktiivvõimsuse reguleerimine toimub Mvar-ides. Sellest tulenevalt mõjutavad tööstuskontrolleri ja reaalaajasimulaatori vahelistes analoogühendustes tekkivad kaod kõige rohkem sünkroongeneraatorit. Samas on katsetulemused piisavalt täpsed ja proportsionaalse reguleerimisviisi võib lugeda õigeks.

Liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse reguleerimise katsete tulemustest tuvastati, et võrdelise, järjestikulise ja proportsionaalse reguleerimise juhtsüsteemid on koostatud õigesti. Leiti, et võrdelise ja järjestikulise reguleerimise meetodi kasutamisel rakenduvad õigesti ka tootmisüksuste reaktiivvõimsuste piirajad. Võrdelise meetodi puhul ei põhjustanud ühe tootmisüksuse reaktiivvõimsuse piiri saavutamine teiste tootmisüksuste reaktiivvõimsuste võrdelises reguleerimises ebavõrdsust. Selgus, et isegi juhul kui tootmisüksuste reaktiivvõimsused on maksimaalsete väärtuste lähedased ei pea suure tõenäosusega kasutama reaktiivkoormuse vähendamist. Põhjus on selles, et sünkroongeneraatori tootmissuunalise reaktiivvõimsuse piir on maksimaalse reaktiivvõimsuse korral suhteliselt kõrge. Lisaks on akupanga reaktiivvõimsus piiratud 5 MW-ga, mis tähendab, et sellega on alati võimalik toota vähemalt 3 Mvar reaktiivvõimsust. Nendest kahest tootmisüksusest piisab kogu elektrivõrgu maksimaalse reaktiivkoormuse ja reaktiivvõimsuskadude katmiseks. Lisaks ei tööta päikese- ja tuuleelektrijaam suure tõenäosusega maksimaalse reaktiivvõimsusega, mis tähendab, et ka neid on võimalik reaktiivkoormuse katmiseks kasutada. Lisaks leiti katsetulemustest, et reaktiivvõimsuse järjestikuline reguleerimine võib põhjustada olukorra, kus osad tootmisüksused tarbivad reaktiivvõimsust samal ajal kui teised tootmisüksused toodavad reaktiivvõimsust. Sellest tulenevalt on eelistatavamad võrdeline ja proportsionaalne reguleerimisviisid.

5.3 Saartalitluse katsete tulemused

Järgnevalt teostati katsed koostatud juhtalgoritmide saartalitluse võime tuvastamiseks sünkroongeneraatoriga ja sünkroongeneraatorita saartalitlusel. Teostati katsed, kus

uuriti saartalitluse teket ning saartalitluse ajal suurima koormuse avariilist välja lülitumist ja ühe tootmisüksuse välja lülitumist. Järgnevalt on esitatud saartalitluse tekke katsete tulemused. Koormuse ja ühe tootmisüksuse välja lülitumise katsete tulemused on esitatud lisas 1.

Esimesel katsel uuriti olukorda, kus tekib sünkroongeneraatoriga saartalitlus. Saartalitlusel on eesmärgiks hoida konstantset sagedust 50 Hz ja alajaama AJ1 teise sektiooni pinget tasemel 6,4 kV. Siinkohal on välja toodud tööstuskontrolleri ja reaalarajasimulaatori juhtalgoritmidega teostatud katsete tulemused, mille eesmärgiks on võrrelda kontrolleri juhtalgoritmide toime võimalikke sarnasusi ja erinevusi reaalarajasimulaatori juhtalgoritmide toimest kiirete protsesside korral. Kirjeldatud katse tulemused tööstuskontrolleri juhtalgoritmidega on esitatud joonisel 5.10 ja reaalarajasimulaatori juhtalgoritmidega joonisel 5.11. Mõlemate juhtalgoritmidega teostatud katsete algseis oli seejuures võimalikult sarnane.

Katsete käigus leiti piirjuhtum, mida on joonisel 5.10 näidatud, kus vaadeldav elektrivõrk jäi peale saartalitluse tekkimist stabiilseks. Praegusel juhul on selleks olukord, kus elektrivõrgu koormus 85% maksimaalsest võimalikust koormusest. Sünkroongeneraatori aktiivvõimsus oli enne katse algust 6,32 MW, päikeseelektrijaama aktiivvõimsus oli 4,03 MW, tuuleelektrijaama aktiivvõimsus oli 4,02 MW ja akupanga aktiivvõimsus oli 0 MW. Kõikide tootmisüksuste reaktiivvõimsused olid 0,4 Mvar. Eelnev tähendab, et põhiliselt mõjutab saartalitluse teket liitumispunkti läbiv aktiiv- ja reaktiivvõimsus.

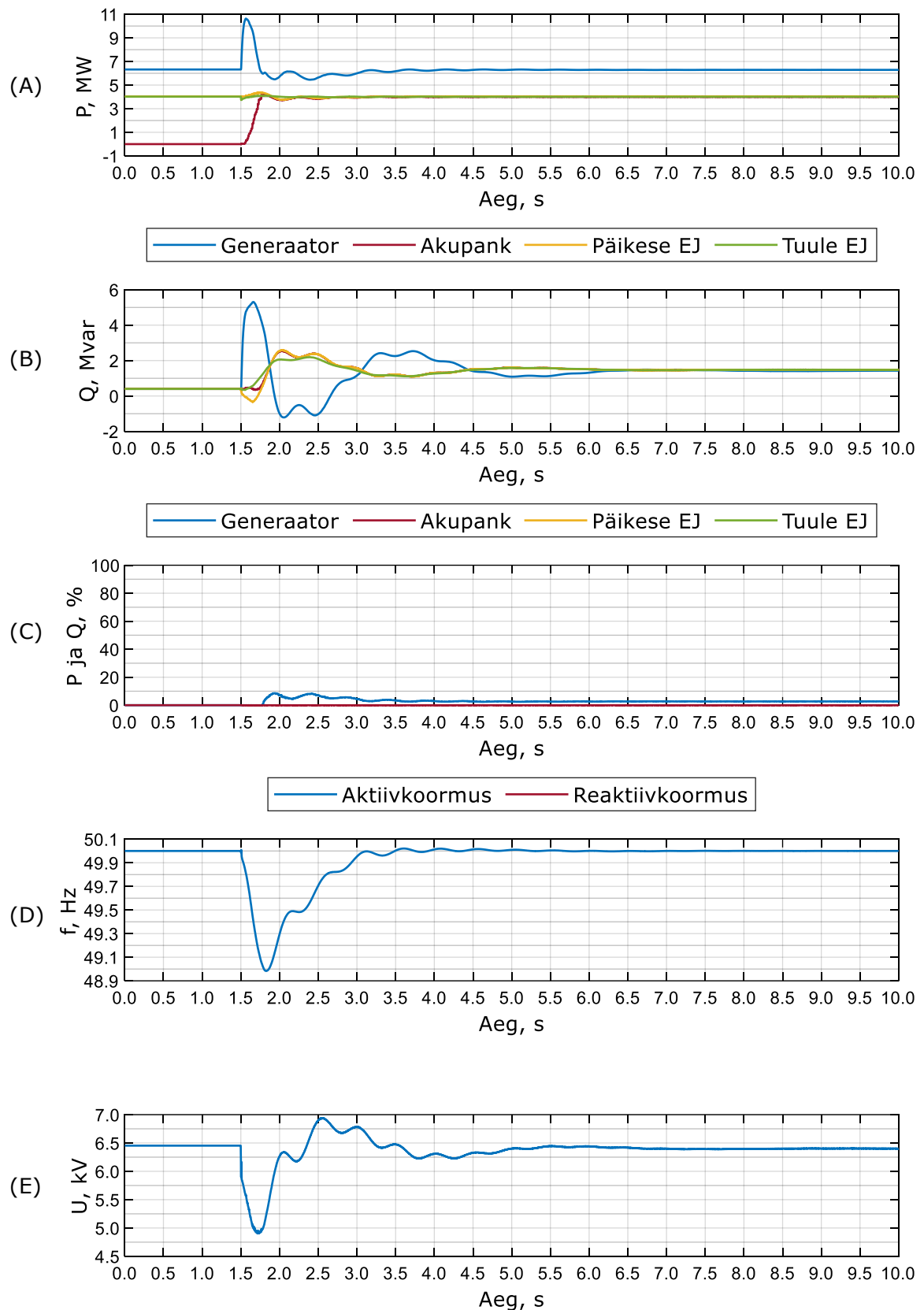
Joonisel 5.10 esitatud graafikult D leiti, et peale saartalitluse teket ajahetkel 1,5 sekundit langeb sagedus ligikaudu 49,0 Hz-ni ajahetkel 1,8 sekundit ja tõuseb tagasi 50 Hz-ni ajahetkel 3,5 sekundit. Sageduse võnkumised lõppevad ligikaudu ajahetkel 6,5 sekundit. Sageduse algsel langemisel selgub graafikult A, et esimesena tõuseb sünkroongeneraatori aktiivvõimsus selle inertsit tõttu. Lisaks hakatakse saartalitluse hetkel suurendama akupanga aktiivvõimsust, mille maksimaalne väärtus saavutatakse ajahetkel 1,7 sekundit. Graafikult C on näha, et akupanga maksimaalse aktiivvõimsuse saavutamisel hakatakse vähendada aktiivkoormust.

Joonisel 5.10 esitatud graafikult E selgub, et alajaama AJ1 teise sektiooni pinge langeb ajahetkelt 1,7 sekundit ligikaudu 5,0 kV-ni. Samas on graafikult näha, et pinge langeb alla 6 kV ainult 0,5 sekundiks. Pinge taastumisel tekib ülevõnge, mille tipp saavutatakse ajahetkel 2,5 sekundit, kui pinge on ligi kaudu 7 kV. Pinge võnkumised lõppevad ligikaudu ajahetkel 8,0 sekundit. Graafikult B tuleb välja, et pinge suuremaid võnkumisi

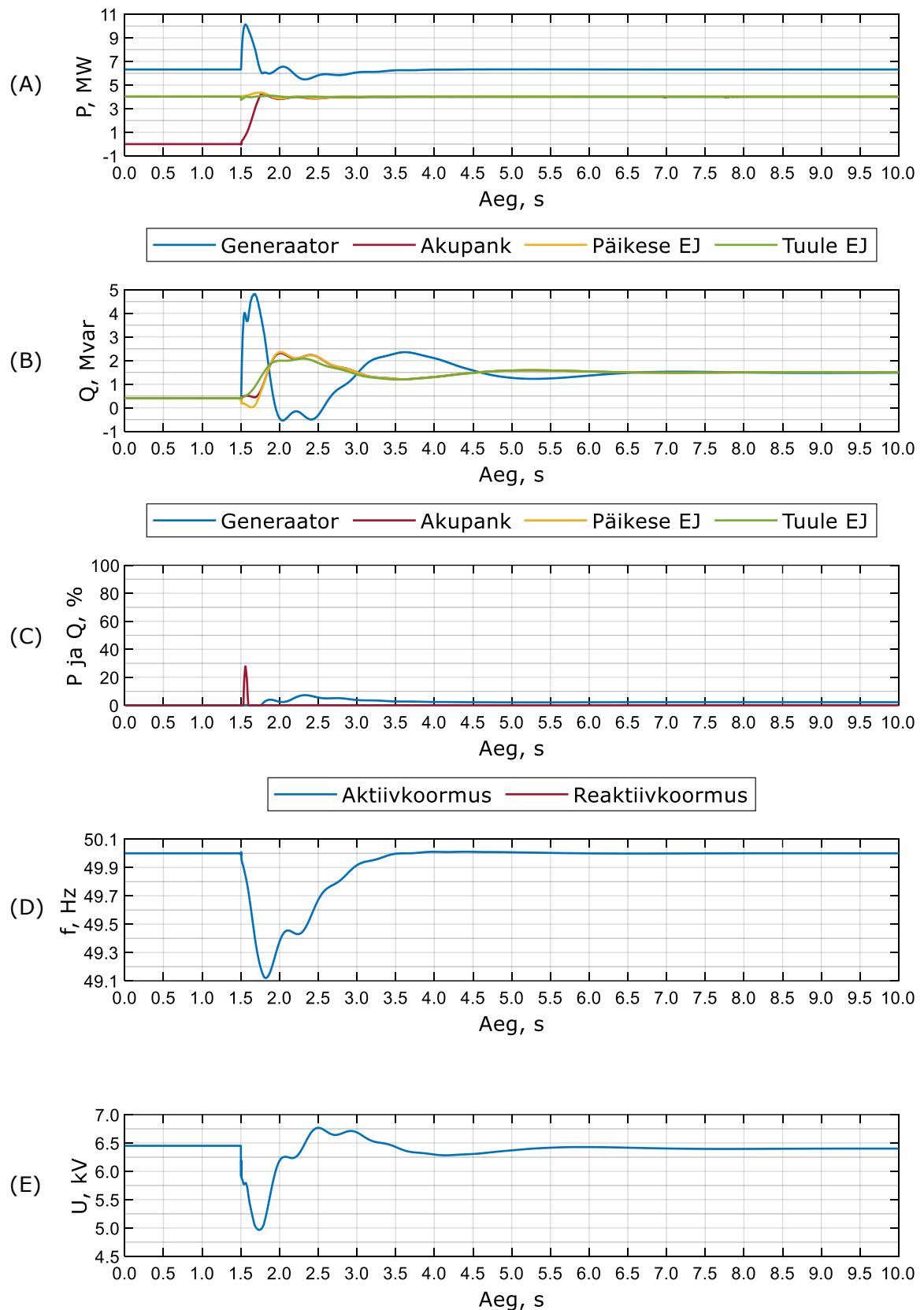
põhjustab peamiselt sünkroongeneraator, mille reaktiivvõimsus võngub teiste tootmisüksuste reaktiivvõimsustele vastu. Reaktiivvõimsuste võrdsus saavutatakse ligikaudu ajahetkel 6,5 sekundit.

Võrreldes tööstuskontrolleri ja reaajasimulaatori juhtalgoritmidega teostatud katsete tulemusi (vastavalt joonised 5.10 ja 5.11) on näha, et stabiilse talitluse saavutamiseks kuluv aeg on ligikaudu sama pikk, mis on ka oodatud tulemus kuna mõlema juhtimissüsteemi regulaatorid seadistati võimalikult sarnasteks. Samas on tööstuskontrolleri katsete tulemustest näha, et nii sagedus kui ka pinge võnguvad väikestes piirides kauem. Eeldatavasti on siin põhjuseks asjaolu, et mõlema juhtimissüsteemi regulaatorite parameetrid ei ole täpselt võrdsed ja tööstuskontrolleri regulaatorid on siiski natuke kiiremad. Samas võib väikseid võnkumisi põhjustada ka tööstuskontrolleri ja reaajasimulaatori asünkroonne töö ehk reaajasimulaatori võrgutalitluse arvutuste ajasamm on tööstuskontrolleriga võrreldes nihkes. Lisaks on graafikutelt D näha, et tööstuskontrolleri juhtimissüsteemi kasutamisel on sageduse lohk suurem ja minimaalne sagedus on ligikaudu 49,0 Hz. Samal ajal on reaajasimulaatori juhtimissüsteemiga teostatud katses minimaalne sagedus 49,1 Hz. Siin on peamiseks põhjuseks jällegi ajaline viide reaajasimulaatori ja tööstuskontrolleri vahel. See tähendab, et kiirete protsesside ajal jõuab sagedus langeda rohkem. Samas on graafikute üldkujud väga sarnased ja erinevusi võib põhjustada ka see, et katsete algseisud ei olnud täpselt samad. Seega on tööstuskontrolleri juhtimissüsteemi toime põhimõtteliselt võrdne analoogse reaajasimulaatori juhtimissüsteemi toimega.

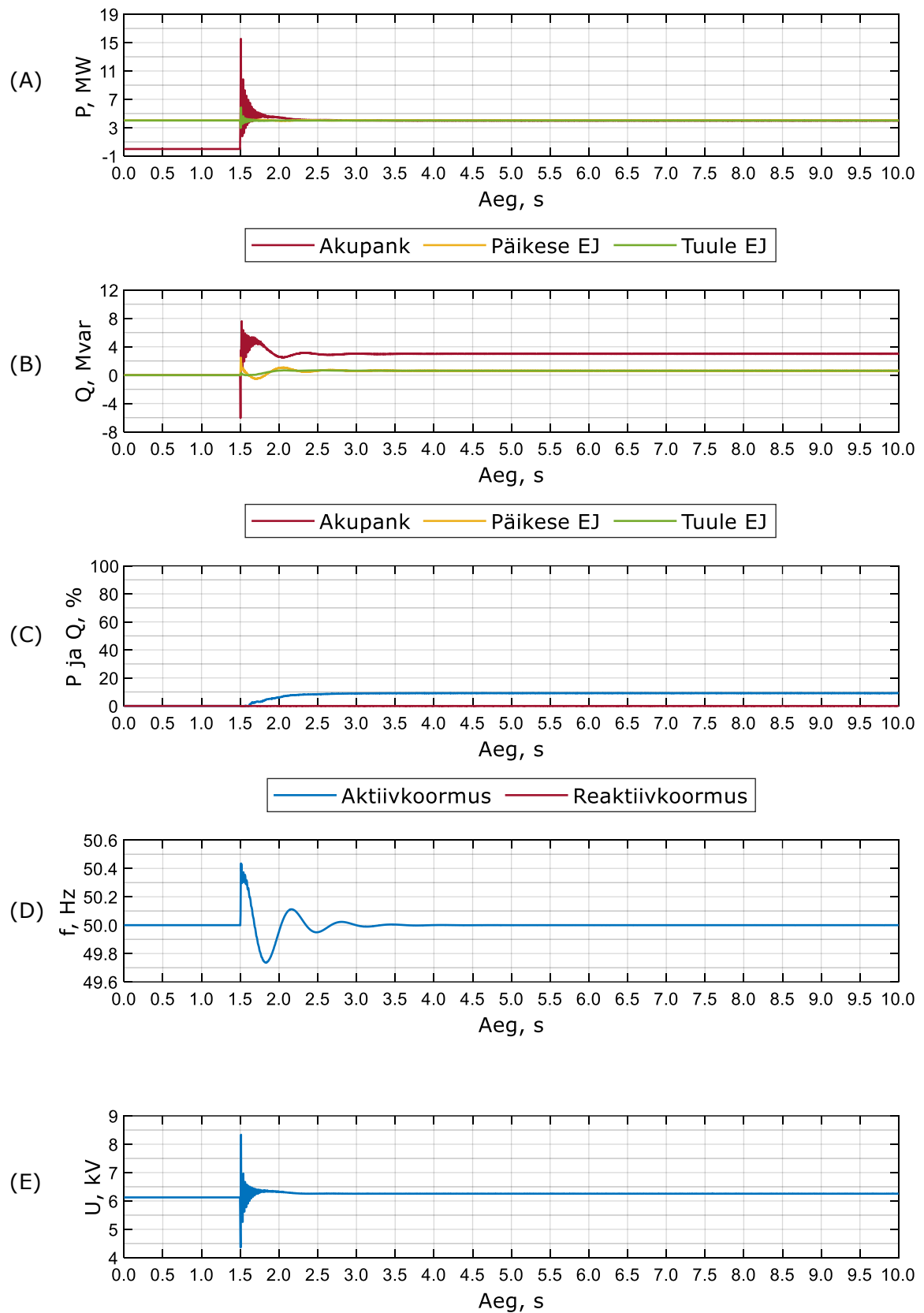
Järgnevalt vaadeldi sünkroongeneraatorita saartalitlust, mille katse käik oli analoogne eelnevalt kirjeldatud katsele. Siinkohal oli koormus aga 60% maksimaalsest võimalikust koormusest. Nagu kirjeldatud lõputöö jaotises 3.8.5, ei ole generaatorita saartalitluse korral regulaatorite otseseks eesmärgiks enam hoida konstantset pinget alajaama AJ1 teise sektsiooni lattidel, vaid pinget hoiab akupank. Akupanga lattidel määrati pinget sätteväärtuseks 0,49 kV. Lisaks on akupanga eesmärgiks hoida konstantset sagedust 50 Hz. Regulaatorite eesmärgiks on juhtida teiste tootmisüksuste aktiiv- ja reaktiivvõimsusi ning koormusi, et toetada akupanga tööd ja välistada selle pikaajaline talitus väljaspool lubatud piire. Kirjeldatud katse tulemused tööstuskontrolleri juhtalgoritmidega on esitatud joonisel 5.12.



Joonis 5.10 Sünkroongeneraatoriga saartalitluse teke tööstuskontrolleri juhtalgoritmiga. A - tootmisüksuste aktiivvõimsused, B - tootmisüksuste reaktiivvõimsused, C - koormuse vähendamise protsent, D - elektrivõrgu sagedus, E - alajaama AJ1 teise sektsiooni pinge



Joonis 5.11 Sünkroongeneraatoriga saartalitluse teke reaalarjasimulaatori juhtalgoritmitiga. A – tootmisüksuste aktiivvõimsused, B – tootmisüksuste reaktiivvõimsused, C – koormuse vähendamise protsent, D - elektrivõrgu sagedus, E - alajaama AJ1 teise sektsiooni pinge



Joonis 5.12 Sünkroongeneraatorita saartalitluse teke. A – tootmisüksuste aktiivvõimsused, B – tootmisüksuste reaktiivvõimsused, C – koormuse vähendamise protsent, D – elektrisüsteemi sagedus, E – alajaama AJ1 teise sektsiooni pinge

Joonisel 5.12 esitatud graafikult A on näha, et saartalitluse tekkel tõuseb akupanga aktiivvõimsus hetkeliselt ligikaudu 16 MW-ni. Seetõttu ei teki ka saartalitluse alguses sageduse (graafik D) langust, vaid see tõuseb ligikaudu 50,4 Hz-ni. Sellele järgneb sageduse alavõnge, mille miinimumiks on ligikaudu 49,7 Hz. Kuna akupanga maksimaalset aktiivvõimsust ületatakse ning päikese- ja tuuleelektrijaama aktiivvõimsused on maksimumis, vähendatakse aktiivkoormust 10% võrra (graafik C). Sageduse siirdeprotsess kestab ligikaudu kaks sekundit ja lõppeb ajahetkel 3,5 sekundit. Joonisel 5.14 esitatud graafikult E on näha, et pinge muutub saartalitluse tekkel hetkeliselt piirides 4,5...8,5 kV. Samas kestab pinge siirdeprotsess ligikaudu 0,2 sekundit. Graafikult B on näha, et saartalitluse tekkel tõuseb akupanga reaktiivvõimsus hetkeks ligikaudu 8 Mvar-ni, mistõttu suurendatakse päikese- ja tuuleelektrijaama reaktiivvõimsust.

Saartalitluse katsete tulemustest on näha, et koostatud juhtimissüsteemi ja tööstuskontrolleriga on võimalik juhtida saartalitluse tekke protsesse. Lisaks ei erine tööstuskontrolleri juhtimissüsteemiga teostatud katsete tulemused oluliselt reaalarjasimulaatori juhtimissüsteemiga teostatud katsete tulemustest. Väikseid erinevusi võib tekitada asjaolu, et regulaatorite parameetrid ei ole täpselt samad. Siinkohal võib täpsemalt seadistada regulaatorite parameetreid, kuid enne tööstuskontrolleri reaalsel kasutusele võttu tuleb neid kohapeal samuti kontrollida ja ümber seadistada. Lisaks võis katsete tulemuste erinevusi põhjustada see, et katsete algseis ei olnud täpselt sama. Võrreldes sünkroongeneraatoriga ja generaatorita saartalitluse tulemusi on näha, et generaatoriga saartalitluse puhul toimuvad siirdeprotsessid kiiremini. Põhjuseks on siin asjaolu, et läbi jõuelektronika seadmete ühendatud tootmisüksus on võimalik reguleerida kiiremini kui sünkroongeneraatorit.

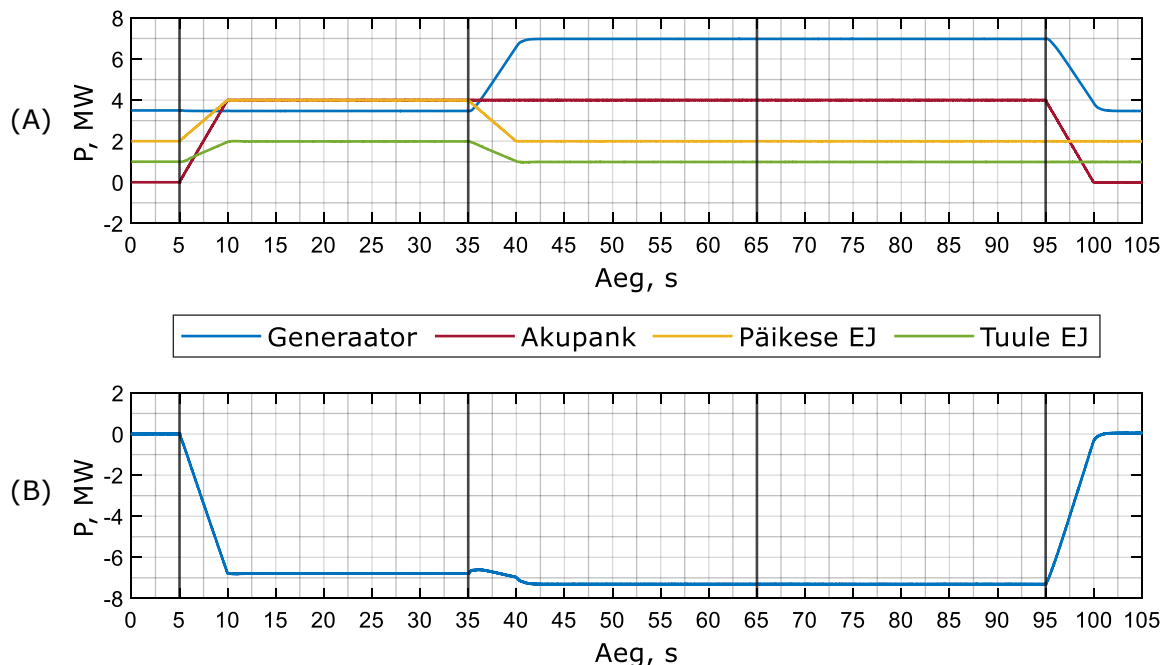
5.4 Sagedusega seotud süsteemiteenuste katsete tulemused

Järgnevalt testiti sagedusega seotud süsteemiteenuste pakkumiseks koostatud juhtalgoritmide toimimist. Esimesena teostati katsed, kus süsteemiteenused on kas sisse või välja lülitatud. Teisena teostati katsed, kus ühest süsteemiteenusest on mõni tootmisüksus välja lülitatud. Mõlemal juhul käivitati kõik reservid. Kolmandana teostati katsed, kus käivitati 50% reservidest. Neljandana teostati katsed, kus toimub sageduse

tõus ja aktiivvõimsust on vaja vähendada. Viimasena tuuakse välja näide kiire sageduse reageeringu pakkumisest.

Kõik kirjeldatud katsed teostati analoogselt: ajahetkel 5 sekundit toimub sageduse hoidmise reservide (FCR) käivitamine, ajahetkel 35 sekundit peatatakse FCR ja käivitatakse sageduse taastamise reservid (FRR), ajahetkel 65 sekundit peatatakse FRR ja käivitatakse asendusreservid (RR) ning ajahetkel 95 sekundit peatatakse RR. Järgnevatel joonistel on vastavad ajahetked tähistatud tumedate vertikaaljoontega. Lisaks oli iga katse algseis jälgitavuse huvides sama. Sünkroongeneraator ning päikese- ja tuuleelektrijaam töötasid 50% võrra vähendatud koormusega ning nende aktiivvõimsused olid katsete alguses vastavalt 3,5, 2,0 ja 1,0 MW. Akupanga koormus oli enne katseid alati 0 MW. Kõikide reservide käivitamise ja peatamise kiirusteks määrati näitlikult 5 sekundit. Siinkohal tuleb märkida, et reaalajasimulaatori mudelis kasutatud süsteem oli niivõrd tugev, et katsete mõju sagedusele oli peaaegu olematu, mistõttu sagedust katsete tulemustes eraldi välja ei tooda.

Esimesel katsel oli uuriti olukorda, kus järjestikuliselt käivitati kõik reservid täies mahus ja kuidas need mõjutavad liitumispunkti läbivat aktiivvõimsust. Katse tulemused on esitatud joonisel 5.13.



Joonis 5.13 Kõikide sagedusega seotud süsteemiteenuste järjestikuline käivitamine. A – tootmisüksuste aktiivvõimsused, B – liitumispunkti läbiv aktiivvõimsus

Joonisel 5.13 esitatud on graafikult A näha, et ajahetkel 5 sekundit, kui käivitub FCR, hakkavad akupanga ning päikese- ja tuuleelektrijaama aktiivvõimsused lineaarselt

tõusma. Vastavad regulaatorid seadistati sama kiireks ja nende eesmärgiks oli vajalik reservvõimsus käivitada 5 sekundi jooksul. Sellest tulenevalt on aktiivvõimsuste tõusude kiirused erinevad ja ajahetkel 10 sekundit saavutavad kõik tootmisüksused enda käivitatud reservvõimsuse mahu. Regulaatorid seadistati sama kiireks ka selle tõttu, et liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse muutus oleks lineaarne (graafik B). Samas on graafikult B selgub, et kuigi reserve aktiveeriti 7 MW (akupank 4 MW, päikeseelektrijaam 2 MW ja tuuleelektrijaam 1 MW), suurenes liitumispunkti läbiv võimsus kadude tõttu vähem, millega peab ka süsteemiteenuste pakkumisel arvestama.

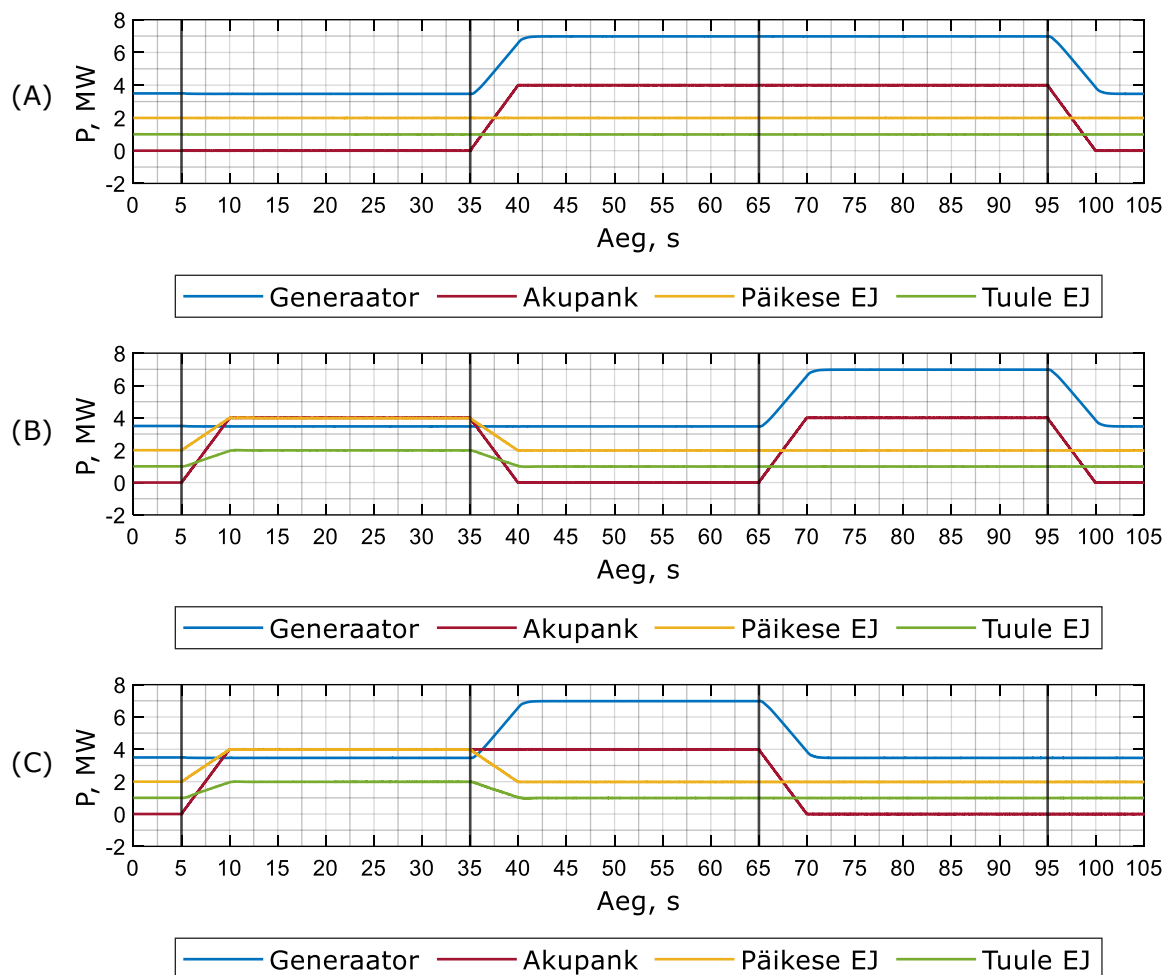
Ajahetkel 35 sekundit on graafikult A näha, et päikese- ja tuuleelektrijaama aktiivvõimsused viiakse viie sekundiga tagasi algväärtustele, sünkroongeneraatori aktiivvõimsust tõstetakse 3,5 MW võrra ning akupanga võimsust ei muudeta kuna see osaleb nii FCR-is kui ka FRR-is. Graafikult B leiti, et kuigi generaatori reservvõimsus 3,5 MW katab päikese- ja tuuleelektrijaama summaarse reservvõimsuse 3 MW väheneb ligikaudu viieks sekundiks liitumispunkti läbiv aktiivvõimsus. Põhjus on siinkohal sünkroongeneraatori turbiini kiirusregulaatori omatoime ajas.

Ajahetkel 65 sekundit selgus mõlemalt graafikult, et muutusi ei toimu kuigi FRR peatati ja RR käivitati. See tuleneb sellest, et reserve käivitamine ja peatamine seadistati sama kiireks, mis aitab teenuse vahetamisel säilitada konstantsed väärtused. Juhul kui reservi peatamine on kiirem järgneva reservi käivitamine, tekib aktiivvõimsustes alavõnge ja vastupidisel juhul ülevõnge, mida sooviti vältida.

Järgnevalt vaadeldi olukordasid, kus üks süsteemiteenus oli täielikult välja lülitatud. Katsete eesmärgiks oli tuvastada, kas süsteemiteenuse välja lülitatud olekus toimub vastavate regulaatorite õige piiramine ehk regulaatorite töö välistamine. Esimesel katsel oli välja lülitatud FCR, teisel katsel oli välja lülitatud FRR ja kolmandal katsel oli välja lülitatud RR. Kirjeldatud katsete tulemused on esitatud joonisel 5.14.

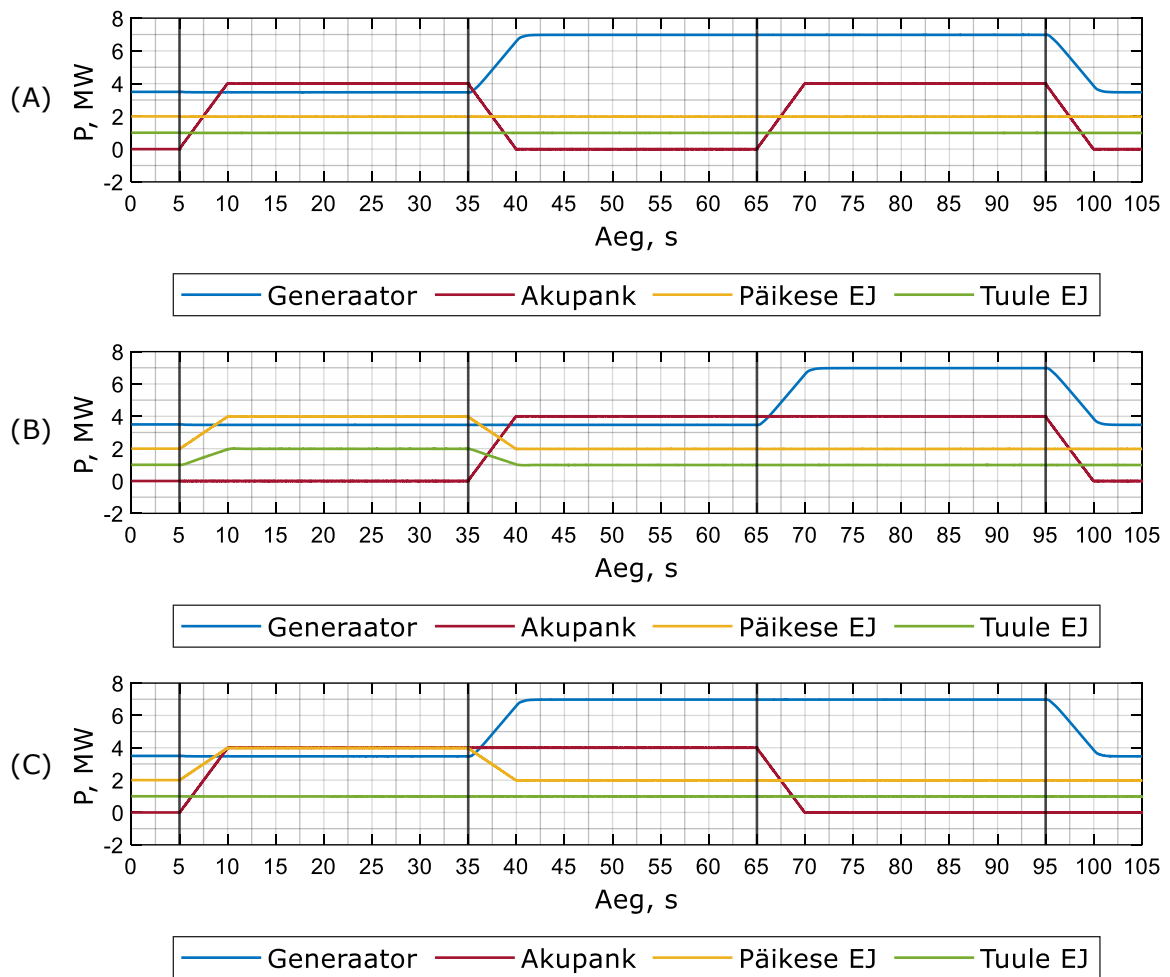
Joonisel 5.14 esitatud graafikult A on näha, et enne ajahetke 35 sekundit, kui käivitatakse FRR, muutusi ei toimu kuna FCR on välja lülitatud. Graafikult B on näha, et ajahetkel 5 sekundit käivitatakse FCR ja ajahetkel 35 sekundit viiakse kõik käivitatud reservid tagasi algväärtustele. Ajahetkel 65 sekundit käivitatakse RR. Graafikult C on näha, et ajahetkel 5 sekundit käivitatakse FCR ja ajahetkel FRR. Ajahetkel 65 sekundit peatatakse FRR ning sünkroongeneraatori ja akupanga aktiivvõimsused viiakse tagasi algväärtustele kuna RR ei tööta. Katsetest saab järeldada, et regulaatorite piirajate väärtuste määramise loogika on koostatud õigesti ehk välja lülitatud reservi regulaatorite väljundid on nullid. Juhtimissüsteemi vale töö näiteks võib tuua olukorra

kui välja lülitatud süsteemiteenusele vastavate regulaatorite väljundid muutuksid kas positiivses või negatiivses suunas. Sellisel juhul oleks graafikutelt näha, et reservi peatamise lõpuks ei ole tootmisüksuse aktiivvõimsus võimsus võrdne algväärtusega, vaid oleks sellest vastavalt kõrgem või madalam.



Joonis 5.14 Sagedusega seotud süsteemiteenuste täielik välja lülitamine. A – FCR väljas, B – FRR väljas, C – RR väljas

Kolmandana vaadeldi olukordasid, kus ühest süsteemiteenusest oli mõni tootmisüksus eraldi välja lülitatud. Katsete eesmärgiks oli jälgida tuvastada blokeeringuahelate, mis välistavad vastava tootmisüksuse reservvõimsuse tagamisest, õige töö. Siinkohal vaadeldi ka, et ühe tootmisüksuse välja lülitamine reservide hulgast ei mõjutaks teiste reservide tööd. Esimesel katsel lülitati sageduse hoidmise reservidest välja päikese- ja tuuleelektrijaam ning sageduse taastamise reservidest akupank. Teisel katsel lülitati sageduse hoidmise reservidest välja akupank ja sageduse taastamise reservidest sünkroongeneraator. Kolmandal katsel lülitati sageduse hoidmise reservidest välja tuuleelektrijaam ja asendusreservidest sünkroongeneraator. Kirjeldatud katsete tulemused on esitatud joonisel 5.15.



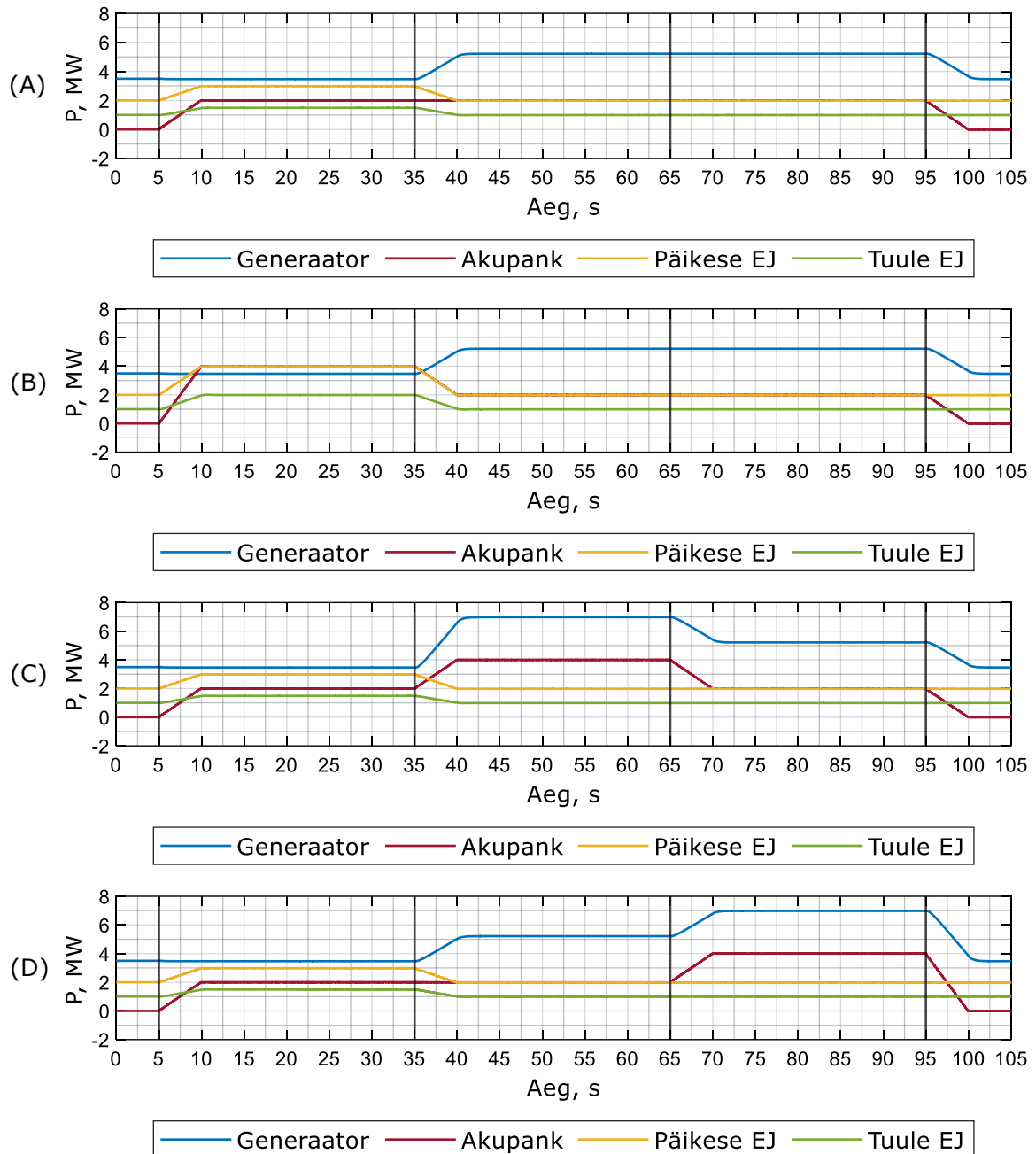
Joonis 5.15 Sagedusega seotud süsteemiteenustest tootmisüksuste eraldi välja lülitamine. A – päikese- ja tuuleelektrijaam FCR-st väljas, akupank FRR-st väljas, B – FCR-st väljas, sünkroongeneraator FRR-st väljas, C – tuuleelektrijaam FCR-st väljas, akupank RR-st väljas

Joonisel 5.15 esitatud graafikult A on näha, et kuigi ajahetkel 5 sekundit käivitatakse FCR, tõuseb ainult akupanga aktiivvõimsus ning päikese- ja tuuleelektrijaama aktiivvõimsused on konstantsed. Ajahetkel 35 sekundit viiakse akupanga aktiivvõimsus tagasi algväärtusele kuna see on FRR-st välja lülitatud. Graafikult B on näha FCR-i ajal suurenevad ainult päikese- ja tuuleelektrijaama aktiivvõimsused ning akupanga võimsus on konstantne, kuna see on FCR-st välja lülitatud. Ajahetkel 35 sekundit on näha, et sünkroongeneraatori võimsus ei muutu, kuna see on FRR-st välja lülitatud. Graafikult C on näha, et terve katse vältel on tuuleelektrijaama aktiivvõimsus konstantne kuna see on FCR-st välja lülitatud ning FRR-s ja RR-s see ei osale. Akupanga aktiivvõimsust tõstetakse FCR-i alguses ja langetatakse FRR-i lõpus, kuna RR-is see ei osale. Joonisel 5.15 esitatud katsete tulemustest saab järeldada, et blokeeringuahelad, mis välistavad tootmisüksuse vastavast reservist töötavad õigesti ning välistavad vastava tootmisüksuse reservi pakkumisest. Lisaks selgus katsete tulemustest, et tootmisüksuste, mis ei ole reservidest välja lülitatud, tööd ühe või mitme tootmisüksuse välja lülitamine ei mõjuta.

Neljandana testiti algoritmide tööd olukorras, kus reserve kasutatakse erinevas mahu. Katsete esmaseks eesmärgiks oli tuvastada, kas vajaliku reservvõimsuse jaotamine tootmisüksuste vahel töötab õigesti. Teiseks eesmärgiks oli vaadelda, et üleminekul ühelt süsteemiteenuselt teisele, kui nende käivitamise mahud on erinevad, ei tekiks üle- ega alavõnkeid või ajalisi viiteid. Esimesel katsel käivitati kõik reservid 50% mahu. Teisel katsel käivitati 100% sageduse hoidmise reservidest ning 50% sageduse taastamise reservidest ja asendusreservidest. Kolmandal katsel käivitati 100% sageduse taastamise reservidest ning 50% sageduse hoidmise reservidest ja asendusreservidest. Neljandal katsel käivitati 100% asendusreservidest ning 50% sageduse hoidmise ja taastamise reservidest. Enne katse algust oli sünkroongeneraatori reservvõimsus 3,5 MW, akupanga reservvõimsus 4,0 MW, päikeseelektrijaama reservvõimsus 2,0 MW ja tuuleelektrijaama reservvõimsus 1,0 MW. Sellest tulenevalt oli sageduse hoidmise reservide kogumaht 7,0 MW ning sageduse taastamise reservide ja asendusreservide kogumaht 7,5 MW. Kirjeldatud katsete tulemused on esitatud joonisel 5.16.

Joonisel 5.16 esitatud graafikult A on näha, et sageduse hoidmise reservide käivitamisel suurendatakse akupanga võimsust 2 MW võrra, päikeseelektrijaama võimsust 1 MW võrra ja tuuleelektrijaama võimsust 0,5 MW võrra ehk kõikide tootmisüksuste aktiivvõimsusi tõsteti 50% võrra vastava tootmisüksuse reservvõimsusest. Ajahetkel 35 sekundit akupanga aktiivvõimsus ei muutu ning püsib tasemel 2 MW. Samal ajal tõstetakse sünkroongeneraatori aktiivvõimsust 1,75 MW võrra 5,25 MW-ni ehk generaatori aktiivvõimsust tõstetakse 50% võrra.

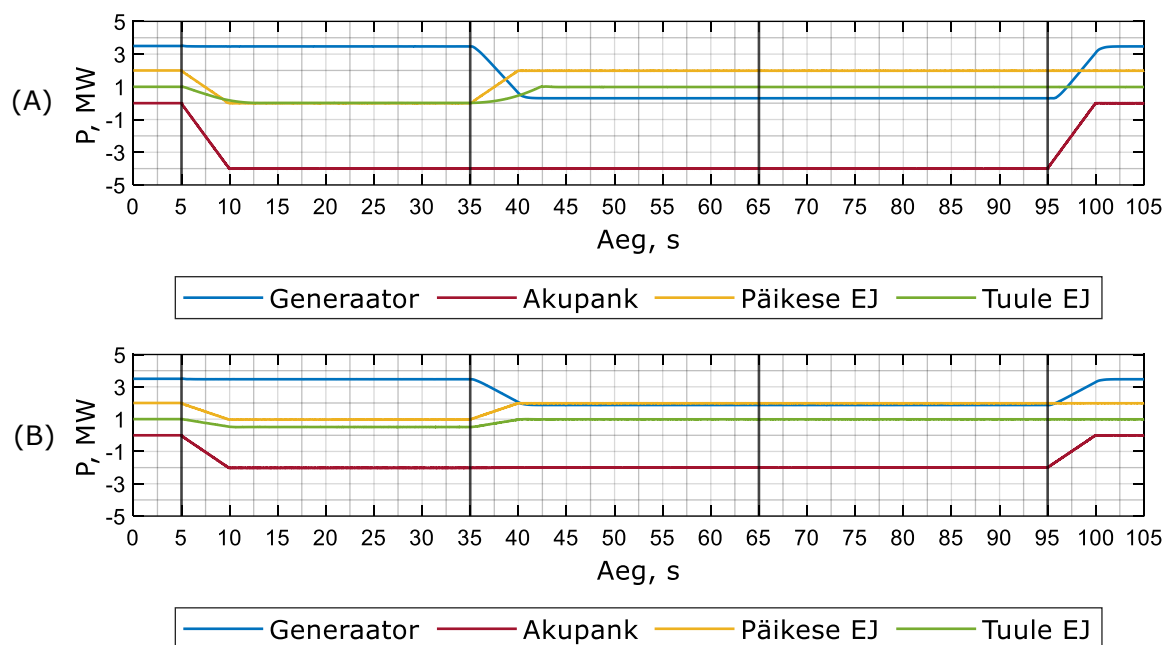
Graafikult B on näha, et ajahetkel 5 sekundit käivitatakse 100% sageduse hoidmise reservidest ning akupanga aktiivvõimsus tõstetakse 4 MW-ni. Ajahetkel 35 sekundit peatatakse sageduse hoidmise reservid ja käivitatakse 50% sageduse taastamise reservidest. Graafikult B selgub, et kuigi akupanga sageduse hoidmise reservide regulaatori sisendit (joonis 4.16) vähendatakse 4 MW võrra ja sageduse taastamise reservide regulaatori sisendit tõstetakse 2 MW võrra, ei järgne sellele akupanga aktiivvõimsuses alavõnget. Sama selgub ka graafikutel C ja D esitatud katsete tulemustest, kus ajahetkel 70 sekundit ei toimu sünkroongeneraatori ja akupanga aktiivvõimsustes vastavalt ala- ega ülevõnkeid. Lisaks leiti graafikutelt B, C ja D, et kuigi reserve käivitatakse erinevas mahu, ei teki lõpptulemusena tootmisüksuste aktiivvõimsustes ajalisi viiteid ning reguleerimist alustatakse täpselt määratud hetkel ja reguleerimise lõppseis saavutatakse alati viie sekundiga.



Joonis 5.16 Sagedusega seotud süsteemiteenuste käivitamine vähendatud mahus. A - kõik reservid 50%, B - FCR 100%, FRR ja RR 50%, C - FRR 100%, FCR ja RR 50%, D - RR 100%, FCR ja FRR 50%

Eelnevatel katsetel simuleeriti sageduse langemist. Järgnevalt testitakse algoritimide tööd olukorras, kus sagedus tõuseb ning tootmisüksuste aktiivvõimsusi on vaja vähendada. Teostati kaks katset, sest eelnevalt tõestati, et reservi täielik välja lülitamine, ühe tootmisüksuse välja lülitamine reservist töötavad õigesti ja reservide käivitamise erinev maht ei tekita üle- ega alavõnkeid või ajalisi viiteid. Esimesel katsel simuleeriti olukorda, kus igat reservi kasutati mahus -100%. Teisel katsel simuleeriti olukorda, kus igat reservi kasutati mahus -50%. Siinkohal tuleb arvestada, et

sünkroongeneraatori minimaalne aktiivvõimsus on 0,3 MW ehk selle alla reguleerimise võime on 3,2 MW. Kirjeldatud katsete tulemused on esitatud joonisel 5.17.

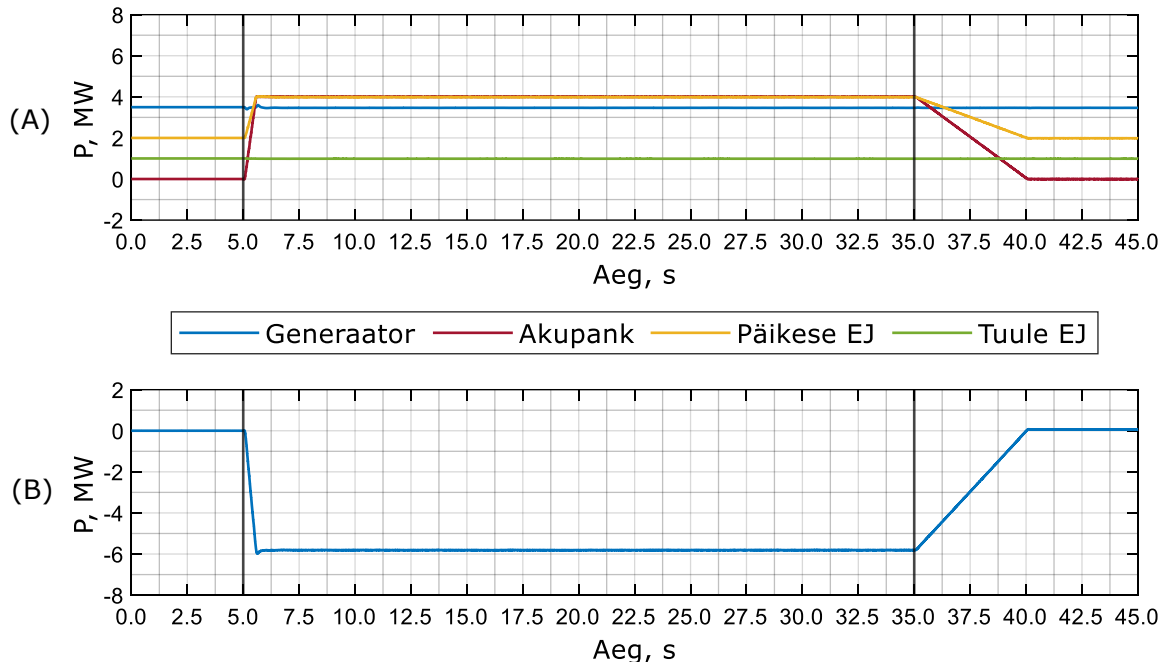


Joonis 5.17 Reservide käivitamine sageduse tõusul. A – kõik reservid -100%, B – kõik reservid -50%

Joonisel 5.17 esitatud graafikult A on näha, et kõikide tootmisüksuste aktiivvõimsused viiakse alati minimaalsele tasemele kuna käivitati 100% reservvõimsuse mahust. Graafikult A tuleb välja, et tuuleelektrijaama alla reguleerimine on aeglasem kui eelnevalt vaadeldud üles reguleerimised ja seega jõuab selle aktiivvõimsus miinimumini teistest tootmisüksustest hiljem. Graafikult B on näha, et FCR-i ajal vähendatakse tuuleelektrijaama aktiivvõimsust 0,5 MW võrra ja päikeseelektrijaama aktiivvõimsust 1 MW võrra. Samas suurendatakse akupanga tarbimissuunalist aktiivvõimsust 2 MW-ni ehk kõikide tootmisüksuste reservide mahust kasutatakse ära 50%, mis oli ka katse eesmärk. FFR-i ja RR-i ajal on graafikult B näha, et sünkroongeneraatori aktiivvõimsust vähendatakse ligikaudu 1,9 MW-ni ehk 1,6 MW või 50% võrra. Akupanga aktiivvõimsust samal ajal ei muudeta. Sellest saab järeldada, et ka alla reguleerimisel töötavad koostatud juhtalgoritmid õigesti.

Järgnevalt tuuakse välja näide kiire sageduse reageeringu (FFR) süsteemiteenuse pakkumisest. Kasutatakse kombinatsiooni Texase ERCOT-i [15] ja Soome ülekandevõrguoperaatori Fingrid [14] lahendustest. Texasel on nõutud terve reservvõimsuse käivitamist 0,5 sekundi jooksul, mis seati eesmärgiks FFR-i käivitamisel. Soomes on reservi peatamise kiiruseks määratud maksimaalselt 20% reservi mahust sekundis ehk reservid peatatakse minimaalselt viie sekundiga. FFR-i

näiteks kasutati eelnevalt koostatud FCR-i regulaatoreid, mis seadistati vastavalt eelnevalt kirjeldatud nõuetele. Lisaks lülitati tuuleelektrijaam FFR-ist välja, sest selle aktiivvõimsust ei ole võimalik vajaliku kiirusega tõsta. Katse tulemused on esitatud joonisel 5.18.



Joonis 5.18 Kiire sageduse reageering näide. A – tootmisüksuste aktiivvõimsused, B – liitumispunkti läbiv aktiivvõimsus

Joonisel 5.18 esitatud graafikult A selgub, et akupank ja päikeseelektrijaam on võimelised enda aktiivvõimsust tõstma reservvõimsuse mahu võrra 0,5 sekundiga alates ajahetkest 5 sekundit, kui FFR käivitati. Akupanga ja päikeseelektrijaama aktiivvõimsust hakatakse vähendama ajahetkel 35 sekundit ja algseis saavutatakse ajahetkeks 40 sekundit ehk reguleerimine lõpetatakse täpselt viie sekundiga. Katse tulemustest saab järeldada, et akupanga ja päikeseelektrijaamaga on võimalik pakkuda kiire sageduse reageeringu süsteemiteenust.

Käesolevas jaotises esitatud katsete tulemustega veenduti sagedusega seotud süsteemiteenuste pakkumiseks koostatud juhtimissüsteemi õiges töös. Esimesel katsel testiti reserve järjekululist aktiveerimist ja nende mõju liitumispunkti läbivale aktiivvõimsusele. Katse tulemustest selgus, et iga tootmisüksuse reservi käivitamine ja peatamine toimub ajalisel sama kiiresti, mis oli koostatud juhtalgoritmide eesmärgiks. See tähendab, et liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse muutus on lineaarne. Järgnevate katsetega tõestati, et süsteemiteenuse täielik välja lülitamine või mõne tootmisüksuse välja lülitamine ühest süsteemiteenusest ei mõjuta teiste süsteemiteenuste või tootmisüksuste reservvõimsuste käivitamise ja peatamise kiirusi. Lisaks tõestati, et

reservide erinev maht ei põhjusta aktiivvõimsuse üle- ega alavõnkeid või ajalisi viiteid regulaatorite töös. Koostatud juhtalgoritmidega on võimalik vastavalt vajadusele seada paika õige algseis, millega pakkuda sagedusega seotud süsteemiteenuseid. Muidugi peab sageduse hoidmise reservides kasutatava päikese- ja tuuleelektrijaama puhul täpselt ennustama ilmastikuolusid, et vältida nende reservvõimsuse puudujääki juhul kui seda on vaja käivitada. Lisaks teostati katse, millega näidati, et päikeseelektrijaama ja akupangaga on võimalik pakkuda ka kiiret sageduse reageeringut. Siinkohal on võimalik muuta ka regulaatorite kiiruseid nii, et korraga pakkuda päikeseelektrijaama ja akupangaga kiiret sageduse reageeringut samal ajal sageduse hoidmise reservidega, kus võib osaleda ka tuuleelektrijaam.

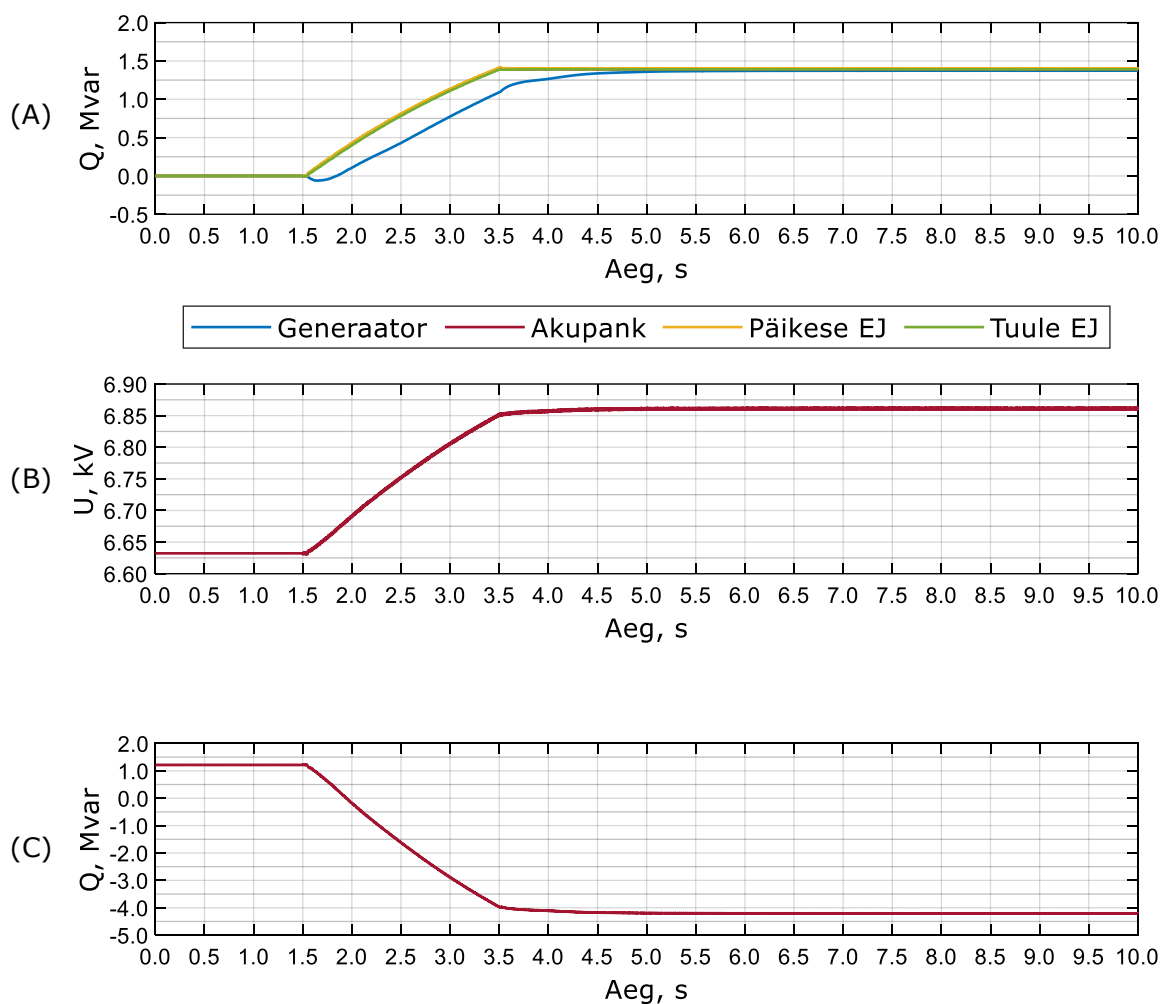
5.5 Pingega seotud süsteemiteenuste katsete tulemused

Pingega seotud süsteemiteenuste puhul testiti algoritmide tööd neljas olukorras: reaktiivvõimsuse reguleerimisel, alajaama AJ1 pingest reguleerimisel, liitumispunkti võimsusteguri reguleerimisel ja kiiret reaktiivvoolu sisestusel. Kõikidel katsetel kasutati reaktiivvõimsuse võrdset jaotamist tootmisüksuste vahel.

Reaktiivvõimsuse otsene reguleerimine on sama liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse reguleerimisega. Seega testitakse siin ainult olukorda, kus reguleerimise ajal saavutatakse elektrivõrgu mõnes sõlmes maksimaalse pingepiir. Reguleerimise eesmärgiks oli vähendada ülekandevõrgust vaadeldavasse elektrivõrku sisenev reaktiivvõimsus nullini ja seejärel suurendada ettevõtte elektrivõrgust ülekandevõrku väljuvat reaktiivvõimsust 10 Mvar-ni. Katse algseis valiti nii, et reguleerimisel rakenduks pingepiiraja. Kirjeldatud katsete tulemused on esitatud joonisel 5.19.

Joonisel 5.19 esitatud graafikult A on näha, et ajahetkel 1,5 sekundit kui alustatakse reguleerimist tõstetakse akupanga ning päikese- ja tuuleelektrijaama reaktiivvõimsust võrdselt, kuid sünkroongeneraatori reaktiivvõimsus jääb alguses teistest maha. Ajahetkel 3,5 sekundit on graafikult B näha, et saavutatakse pingepiir, milleks määrati 6,85 kV. Samal ajal peatatakse akupanga ning päikese- ja tuuleelektrijaama reaktiivvõimsuse edasine tõus. Samas on sünkroongeneraatori reaktiivvõimsuse regulaator aeglasem kui liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse regulaator. See tähendab, et kuigi liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse väljundi väärtust piiratakse,

tõuseb generaatori reaktiivvõimsus selle reaktiivvõimsuse regulaatori toimeaja tõttu edasi kuni see saavutab teiste tootmisüksustega võrdse seisundi. Graafikult B selgub, et see toob kaasa pinge väikese tõusu üle piirväärtuse. Praegusel juhul määrati pinge ülemine väärtus madalam kui maksimaalselt lubatud väärtus, mistõttu on pinge piiri ületamine lubatud. Samas võib olukorra lahendada ka liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse regulaatori aeglustamisega nii, et generaatori reaktiivvõimsus muutuks kohe teiste tootmisüksuste reaktiivvõimsustega võrdseks.

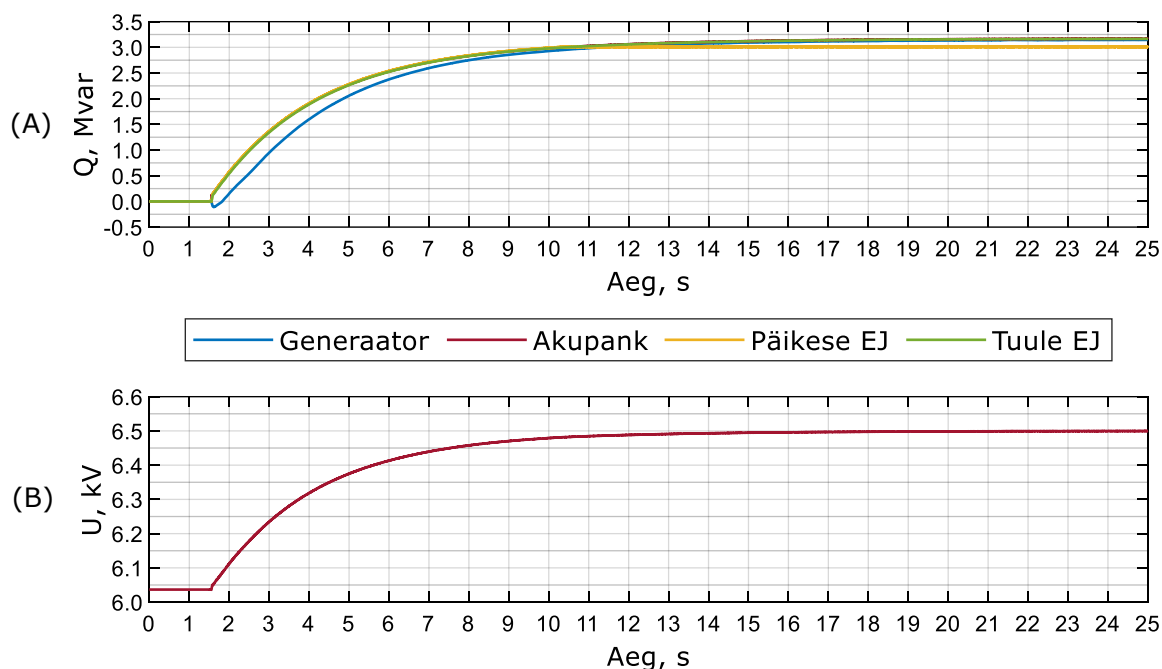


Joonis 5.19 Reaktiivvõimsuse otsene reguleerimine kui saavutatakse pinge piir. A – tootmisüksuste reaktiivvõimsused, B – elektrivõrgu maksimaalne pinge, C – liitumispunkti läbiv reaktiivvõimsus

Teisel katsel kasutati pinge otsest reguleerimist. Reguleerimise eesmärgiks oli tõsta alajaama AJ1 teise sektsiooni pinge tasemele 6,5 kV. Kirjeldatud katse tulemused on esitatud joonisel 5.20.

Joonisel 5.20 esitatud graafikult A tuleb välja, et sarnaselt eelneva olukorraga jääb generaatori reaktiivvõimsus teiste tootmisüksuste reaktiivvõimsustest reguleerimise alguses maha. Ajahetkel ligikaudu 11 sekundit saavutatakse päikeseelektrijaama

reaktiivvõimsus piir, kuid teised tootmisüksused saavutavad lõpuks võrdse seisu, mis näitab, et võrdne reguleerimine toimib õigesti. Graafikult B selgub, et alajaama AJ1 teise sektsiooni pinge 6,5 kV ehk reguleerimise eesmärk täidetakse ligikaudu ajahetkel 20 sekundit ja pinge jääb edasi konstantseks.

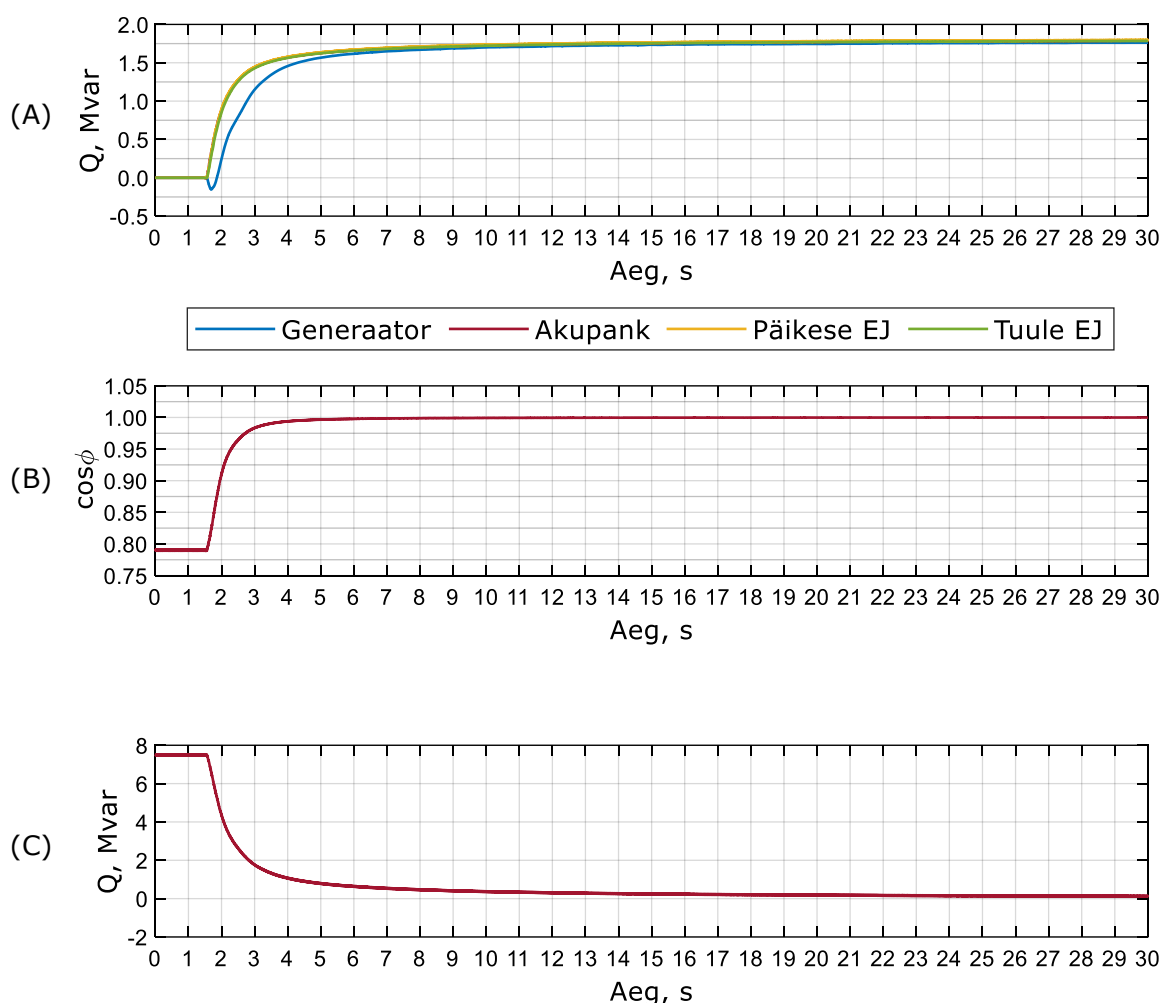


Joonis 5.20 Alajaama AJ1 teise sektsiooni pinge reguleerimine. A – tootmisüksuste reaktiivvõimsused, B – alajaama AJ1 teise sektsiooni pinge

Kolmandal katsel oli reguleerimise eesmärgiks tõsta liitumispunkti läbiva aktiiv- ja reaktiivvõimsuse alusel arvutatud võimsustegur väärtuselt 0,78 väärtusele 1,0. Kirjeldatud katse tulemused on esitatud joonisel 5.21.

Joonisel 5.21 esitatud graafikutelt selgub, et võimsusteguri reguleerimine on alghetkel suhteliselt kiire. Selle põhjustab asjaolu, et võimsusteguri väärtus on võrreldes reaktiivvõimsusega suhteliselt väike ehk regulaatori väikese sisendi korral peab selle väljundis tekitama suure väärtuse. Seetõttu on reguleerimise lõpp aeglane ja eesmärgi täitmiseks peab regulaator olema tugevatoimeline. Graafikult B on näha, et võimsusteguri väärtus 1,0 saavutatakse ligikaudu ajahetkel 21 sekundit. Liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse väärtus olema sellisel juhul 0 Mvar, mida katse vältel ei saavutata. Üheks võimaluseks on muuta võimsusteguri regulaatorit veel tugevatoimelisemaks, mis võimaldab reguleerimist teostada kiiremini. Samas võivad sellisel juhul tekkida reguleerimise alguses ülevõnked, mille vältimist peetakse siinkohal olulisemaks. Teiseks võimaluseks on koostada juhtimissüsteem nii, et võimsusteguri sätteväärtuse ja hetkel liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse alusel arvutatakse reaktiivvõimsuse sätteväärtus, mis vastab soovitud võimsustegurile. Sellisel juhul on

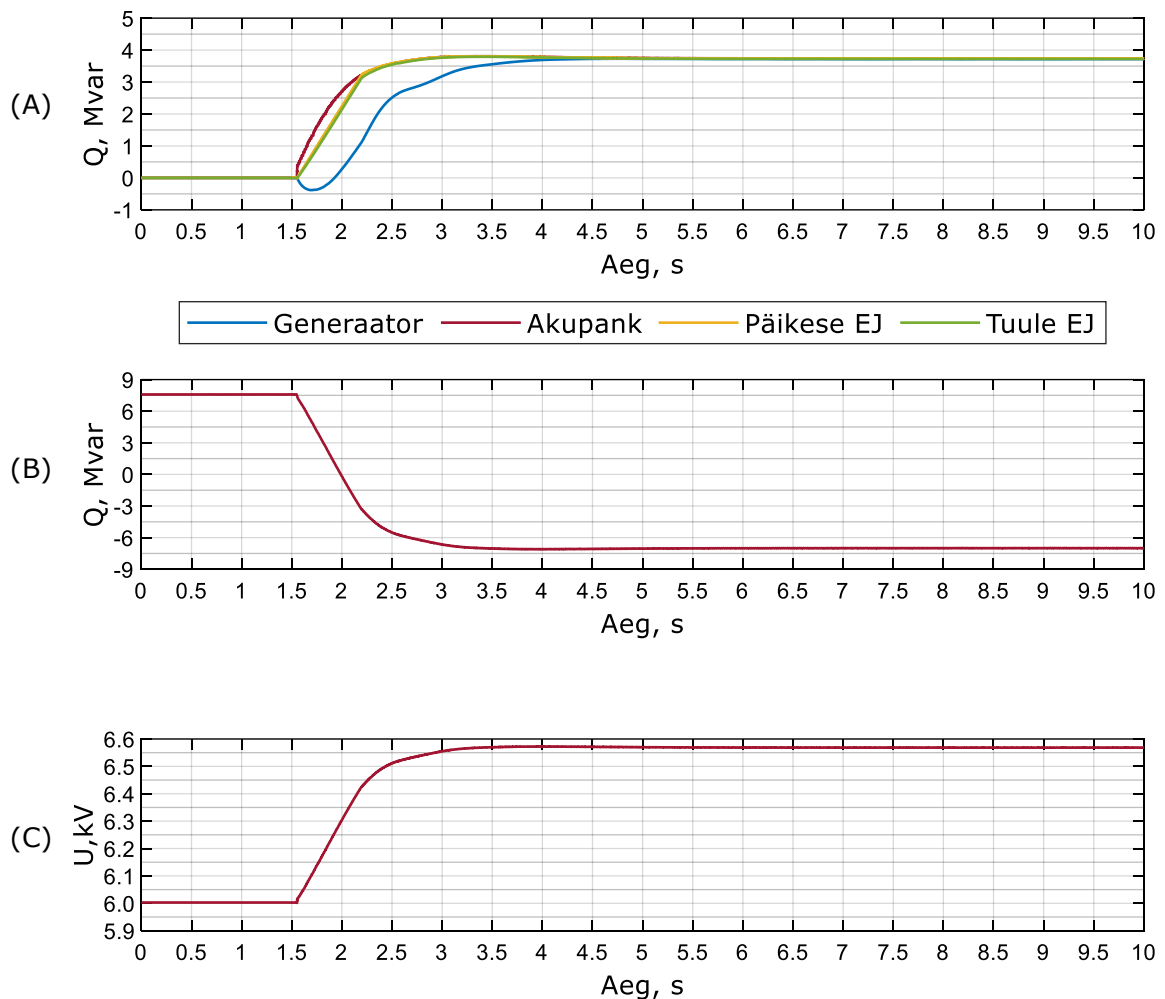
võimalik reguleerimist teostada alghetkel sujuvamalt ning jõuda täpse lõppseisundini kiiremini.



Joonis 5.21 Liitumispunkti võimsusteguri reguleerimine. A – tootmisüksuste reaktiivvõimsused, B – võimsustegur liitumispunktis, C – liitumispunkti läbiv reaktiivvõimsus

Viimasena katsetati kiire reaktiivvoolu sisestuse juhtalgoritmi. Nimetatud süsteemiteenus põhineb liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse reguleerimisel, kuid selle süsteemiteenuse pakkumisel regulaator automaatselt kiiremaks. Järgneval katsel oli eesmärgiks viia ülekandevõrgust ettevõtte elektrivõrku sisenev reaktiivvõimsus nulliks ja seejärel suurendada ettevõtte elektrivõrgust ülekandevõrku väljuvat reaktiivvõimsust 7 Mvar-ni. Kirjeldatud katse tulemused on esitatud joonisel 5.22.

Joonisel 5.22 esitatud graafikult B on näha, et reguleerimise eesmärk saavutatakse ligikaudu ajahetkel 3,5 sekundit ehk tootmisüksuste reaktiivvõimsust tõstetakse kahe sekundiga ligikaudu 15 Mvar võrra. Graafikult A selgub, et kõige kiiremini tõuseb akupanga reaktiivvõimsus ja kõige aeglasemalt sünkroongeneraatori reaktiivvõimsus, kuid lõpuks saavutatakse võrdne seisund.



Joonis 5.22 Kiire reaktiivvoolu sisestuse süsteemiteenus. A – tootmisüksuste reaktiivvõimsused, B – liitumispunkti läbiv reaktiivvõimsus, C – alajaama AJ1 teise sektsiooni pinge

Lõputöö käesolevas jaotises teostatud katsetega näidati koostatud juhtalgoritmide võimekust vastavalt kasutaja valikule reguleerida liitumispunkti läbivat reaktiivvõimsust, alajaama AJ1 teise sektsiooni pinget, liitumispunkti võimsustegurit ja pakkuda kiire reaktiivvoolu sisestuse süsteemiteenust. Lisaks näidati liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse reguleerimise alusel pinge piiraja rakendumist. Katsete käigus leiti, et pinge piiramisel tõuseb pinge määratud piirist veidi kõrgemale. Siinkohal võib määrata madalama pinge piiri, mille korral ei põhjusta pinge liigne tõus probleeme. Teiseks lahenduseks oleks muuta liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse regulaator aeglasemaks. Teiseks olulisemaks tulemuseks on liitumispunkti võimsusteguri reguleerimise kiirus selle alghetkel ning aeglus reguleerimise lõpus. Sujuvama reguleerimise saavutamiseks võib muuta juhtalgoritmi ülesehitust nii, et liitumispunkti võimsusteguri sätteväärtuse ja liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse alusel arvutatakse reaktiivvõimsuse väärtus, mis edastatakse regulaatorisse. Kiire reaktiivvoolu sisestuse süsteemiteenuse regulaatorit on võimalik muuta kiiremaks, kui lubatud on liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse ülevõnge.

5.6 Majanduslik analüüs

Lõputöö käesolevas jaotises analüüsitakse eelnevalt kirjeldatud juhtalgoritmide rakendamise majanduslikku mõju. Esimesena vaadeldakse sagedusega seotud süsteemiteenuste pakkumist. Teisena käsitletakse paindliku liitumise võimaluse kasutamise tasuvust. Kolmandana keskendutakse reaktiivenergia tasude vähendamisele. Viimasena arutletakse katkestustest põhjustatud kulude vähendamise üle. Järgneva analüüsiga ei anta investeerimissoovitusi, vaid vaadeldakse potentsiaalseid võimalusi, mis tulenevad koostatud juhtalgoritmide rakendamisest.

5.6.1 Sagedusega seotud süsteemiteenuste pakkumine

Sagedusega seotud süsteemiteenuste pakkumist uuriti akupanga näitel. Akupanga nimiaktiivvõimsuseks valiti 4 MW ehk võimsus, millega lõputöö eelnevates osades piirati akupanga aktiivvõimsus. Balti riikide sagedus-koormusjuhtimise kontseptsioonidokumentis [6] on märgitud, et sageduse hoidmise reservide maksimaalne tööperiood tootmisüksustel, mis töötavad salvestatud energiaga, on 30 minutit. Lisaks toimub sageduse hoidmise reservide pakkumine sümmeetriliselt ehk korraga pakutakse nii üles kui alla reguleerimist. Eelnevast tulenevalt valiti akupanga mahtuvuseks koos varuga 5 MWh. Liitumioon akudel põhineva akupanga investeeringukulud, muutuvkulud ja püsikulud on esitatud allikas [36].

Ülekandevõrguga liitumise kulud saadi Elering AS-i vabade liitumisvõimsuste arvutusprogrammist (VLA) [51]. Arvestati, et kasutatakse paindliku liitumise võimalust ehk ülekandevõrguga liitumisel peab tasuma ainult liitumispunkti maksumuse. Akupangaga pakutakse ainult sagedusega seotud süsteemiteenuseid ja seega eeldati, et paindliku liitumise puhul kehtivat alla reguleerimise võimalust ülekandevõrgu operaator ei kasuta.

Allika [6] põhjal pakutakse sagedusega seotud süsteemiteenuseid võimsuse hinna (€/MW) alusel ja reservide käivitamisel tasutakse toodetud või tarbitud energia eest (€/MWh). Eestis ei ole veel sagedusega seotud süsteemiteenused kasutusel ja reservvõimsuse hinna määramiseks kasutati Soome ülekandevõrgu operaatori Fingrid Oy viimase viie aasta (2016...2020) keskmiseid hindasid [52]. Soomes on sageduse hoidmise reservid jaotatud normaaltalitusel ja häiringu korral kasutatavateks reservideks (vastavalt FCR-N ja FCR-D). Lõputöös kasutati nende keskmist hinda. Lisaks on allikas [6] märgitud, et süsteemiteenuse osutaja võib sageduse hoidmise reservide

pakkumise kanda üle ka sageduse taastamise reservide pakkumisse juhul kui esimest pakkumist ei võideta. Reservide käivitamisel toodetud või tarbitud energia hinnaks võeti Eesti nelja viimase aasta keskmine elektrienergia hind, mis arvutati allikas [53] esitatud informatsiooni põhjal. Analüüsi käigus arvestati, et akupank osaleb tunnisisesel turul. Arvutusteks kasutatud andmed on kokkuvõtlikult esitatud tabelis 5.1.

Tabel 5.1 Arvutustes kasutatud andmed

Akupanga nimiaktiivvõimsus, MW	4
Akupanga mahtuvus, MWh	5
Akupanga võimsusest sõltuv investeeringukulu, mln €/MW	0,270
Akupanga mahtuvusest sõltuv investeeringukulu, mln €/MWh	0,232
Akupanga püsikulud, €/MW/a	540
Akupanga muutuvkulud, €/MWh	2
Liitumispunkti maksumus, mln €	0,290
Reservvõimsuse keskmine hind, €/MW	12,909
Elektrienergia hind, €/MWh	39,955

Summaarsed investeeringukulud on arvutatavad avaldisega 5.1.

$$I_i = P_{BE} \cdot I_{i1} + C_{BE} \cdot I_{i2} + I_{LP} = 4 \cdot 0,270 + 5 \cdot 0,232 + 0,290 = 2,53 \text{ (mln €)} \quad (5.1)$$

kus I_i – summaarsed investeeringukulud, mln €;
 P_{BE} – akupanga nimiaktiivvõimsus, MW;
 I_{i1} – akupanga võimsusest sõltuv investeeringukulu, mln €/MW;
 C_{BE} – akupanga mahtuvus, MWh;
 I_{i2} – akupanga mahtuvusest sõltuv investeeringukulu, mln €/MWh;
 I_{LP} – liitumispunkti maksumus, mln €.

Järgnevalt vaadeldi nelja juhtumit, kus muudeti tundide arvu, millal akupank osutab reservvõimsuse pakkumist. Esimesel juhul eeldati, et akupank osutab reservvõimsuse pakkumist 100% aastast, teisel juhul 75% aastast, kolmandal juhul 50% aastast ja viimasel juhul 25%. Kõikidel juhtumitel eeldati lisaks, et reservid käivitatakse 50% ajast, millal akupank osutab reservvõimsuse pakkumist. Esimese juhtumi näitel on akupangaga aastas toodetav energia leitav avaldisega 5.2, tulud avaldisega 5.3, kulud avaldisega 5.4 ja rahavood avaldisega 5.5.

$$E_{BE} = P_{BE} \cdot h \cdot x \cdot y = 4 \cdot 8760 \cdot 1 \cdot 0,5 = 17\,520 \text{ (MWh)} \quad (5.2)$$

$$T_{BE} = P_{BE} \cdot h \cdot x \cdot P_p + E_{BE} \cdot P_E = 4 \cdot 8760 \cdot 1 \cdot 12,909 + 17\,520 \cdot 39,955 = 1\,152\,343 \text{ (€)} \quad (5.3)$$

$$K_{BE} = P_{BE} \cdot I_{pBE} + E_{BE} \cdot I_{mBE} = 4 \cdot 540 + 17\,520 \cdot 2 = 37\,200 \text{ (€)} \quad (5.4)$$

$$F_k = T_{BE} - K_{BE} = 1\,152\,343 - 37\,200 = 1\,115\,143 \text{ (€)} \quad (5.5)$$

kus E_{BE} – akupangaga aasta jooksul toodetud energia, MWh;

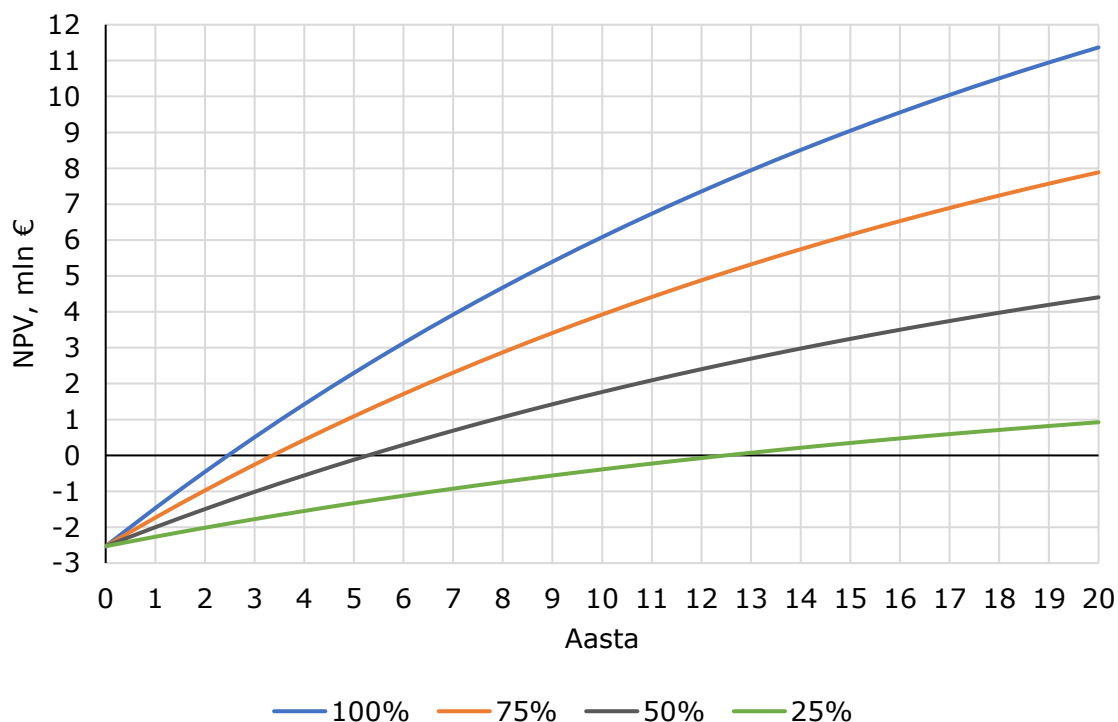
h - tunde aastas;
 x - osa aastast, millal akupank osutab reservvõimsuse pakkumist;
 y - osa reservvõimsuse pakkumisest, millal reservid käivitatakse;
 T_{BE} - tulud, €;
 P_p - reservvõimsuse hind, €/MW;
 P_E - reservenergia hind, €/MWh;
 K_{BE} - kulud, €;
 I_{pBE} - akupanga püsikulud, €/MW;
 I_{mBE} - akupanga muutuvkulud, €/MWh;
 F_k - rahavood aastas, €.

Eelnevalt kirjeldatud olukordade võrdlemiseks kasutati puhasnüüdisväärtust (NPV – *Net Present Value*) [54], mis näitab projekti investeeritud rahast saadavat tulu. Projekt loetakse majanduslikult tasuvaks kui NPV väärtus on suurem kui null ehk tulevased rahavood ületavad esialgseid investeeringukuludid. Puhasnüüdisväärtus on leitav avaldisega 5.6. Diskontomääraks valiti 5% ja projekti elueaks 20 aastat. Arvutuste tulemused on esitatud joonisel. 5.23.

$$NPV = I_i + \sum_{k=1}^n \frac{F_k}{(1+i)^k} \quad (5.6)$$

kus NPV – puhasnüüdisväärtus, €;
 k – vaadeldav aasta;
 n – projekti eluiga;
 i – diskontomäär, %.

Joonisel 5.23 esitatud graafikutelt selgub, et juhul kui akupank osutab reservvõimsuse pakkumist 100% aastast on projekt majanduslikult tasuv kolme aastaga, 75% puhul nelja aastaga, 50% puhul kuue aastaga ja 25% puhul 13 aastaga. Reaalsemaks peetakse juhtumit, kus akupank osutab reservvõimsuse pakkumist 50% või 25% aastast. Põhimõtteliselt võib seda vaadelda kui akupanga võimsuse vähendamist vastavalt 50% või 75% võrra. Samas saab akupangaga pakkuda ka sageduse taastamise reservide süsteemiteenust, mis laiendab akupanga kasutatavust. Põhjalikuma analüüsi käigus peaks arvestama sellega, millal ja kui pikalt reserve kasutatakse, mis näitab täpsemalt akupanga kasutatavust. Siinkohal võib aku kasutatavust piirama hakata selle mahtuvus, kui lühikese ajaväljel peab reserve käivitama mitu korda, mis tähendab, et akupanga laetuse tase võib olla liiga kõrge või madal. Lisaks tuleb põhjalikuma analüüsi käigus arvestada täpsema reservvõimsuse ja -energia hinnaga ning nende prognoosidega.



Joonis 5.23 Projekti puhasnüdisväärtus, kui akupangaga pakutakse ainult sagedusega seotud süsteemiteenuseid. Sinine – reservvõimsuse pakkumist osutatakse 100% aastast, oranž – reservvõimsuse pakkumist osutatakse 75% aastast, hall – reservvõimsuse pakkumist osutatakse 50% aastast, roheline – reservvõimsuse pakkumist osutatakse 25% aastast

5.6.2 Paindliku liitumise võimaluse kasutamise tasuvus

Paindliku liitumise võimaldamiseks koostati liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimise juhtalgoritmid. Siinkohal vaadeldakse selle võimaluse kasutamise tasuvust. Lisaks uuritakse seda olukorras, kus ettevõtte elektrivõrku lisatakse peale akupanga ka tuule- ja päikeseelektrijaam, mille nimiaktiivvõimsusteks valiti 5 MW nagu käesoleva lõputöö eelnevates jaotistes. Tuule- ja päikeseelektrijaama investeringukulud, püsikulud ning tuuleelektrijaama muutuvkulud on esitatud allikas [22]. Päikeseelektrijaama muutuvkuludeks määrati 0 €/MWh. Allika [55] andmetel oli 2020. aastal Eesti tuuleelektrijaamade koguvõimsus 320 MW ja allika [56] alusel toodeti nendega 2020. aastal 823 712 MWh elektrienergiat. Sellest tulenevalt saadi tuuleelektrijaamade kasutusteguriks ligikaudu 0,29. Päikeseelektrijaamade kasutustegur 0,1 määrati Eesti Energia AS päikesepaneelide kalkulaatori [57] alusel.

Akupanga parameetreid võrreldes eelmise jaotisega ei muudetud ja lisaks kasutati seda jällegi ainult süsteemiteenuste pakkumiseks. Eeldati, et akupangaga osutatakse reservvõimsuse pakkumist 50% aastast. Ülekandevõrguga liitumise maksumuse juures tuuakse lisaks liitumispunkti maksumusele välja ka võrgu tugevdamiseks vajalikud

tasud, mis saadi allikast [51]. Elektrienergia maksumust ei muudetud. Analüüsis kasutatud andmed on kokkuvõtlikult esitatud tabelis 5.2.

Tabel 5.2 Analüüsis kasutatud andmed

Tuuleelektrijaama nimiaktiivvõimsus, MW	5
Tuuleelektrijaama investeringukulud, mln €/MW	1,120
Tuuleelektrijaama püsikulud, €/MW/a	14 000
Tuuleelektrijaama muutuvkulud, €/MWh	1,5
Tuuleelektrijaama kasutustegur	0,29
Päikeseelektrijaama nimiaktiivvõimsus, MW	5
Päikeseelektrijaama investeringukulud, mln €/MW	0,420
Päikeseelektrijaama püsikulud, €/MW/a	7 000
Päikeseelektrijaama muutuvkulud, €/MWh	0
Päikeseelektrijaama kasutustegur	0,1
Liitumispunkti maksumus, mln €	0,290
Ülekandevõrgu tugevduse maksumus, mln €	3,567
Elektrienergia hind, €/MWh	39,955

Järgnevalt vaadeldi kahte olukorda, esiteks kui paindliku liitumise võimalust ei kasutata ja teiseks kui seda kasutatakse. Esimese olukorra puhul on algsed investeringukulud tulenevalt ülekandevõrgu tugevdamise maksumusest kõrgemad, kuid alla reguleerimist ei rakendata. See vähendaks tuule- ja päikeseelektrijaama aastas toodetud elektrienergia hulka ja seega ka tulusid. Teise olukorra puhul vaadeldi juhtumeid, kus igal aastal rakendatakse alla reguleerimist vahemikus 0...50%. Eesmärgiks oli teada saada, kas paindliku liitumise võimaluse kasutamine on projekti eluea (25 aastat) lõpuks tasuvam kui selle mitte kasutamine. Seega arvatati iga olukorra ja juhtumi puhul tuule- ja päikeseelektrijaamade aastased elektrienergia toodangud, tulud, kulud ja rahavood. Tuuleelektrijaama aastas toodetav elektrienergia, tulud, kulud ja rahavood on esimese olukorra näitel arvatavad vastavalt avaldistega 5.7, 5.8, 5.4 ja 5.5. Päikeseelektrijaama puhul teostati analoogsed arvutused.

$$E_{WN} = P_{WN} \cdot h \cdot C_{WN} \cdot (1 - z) = 5 \cdot 8760 \cdot 0,29 \cdot (1 - 0) = 12\,702 \text{ (MWh)} \quad (5.7)$$

$$T_{WN} = E_{WN} \cdot P_E = 12\,702 \cdot 39,955 = 507\,508 \text{ (€)} \quad (5.8)$$

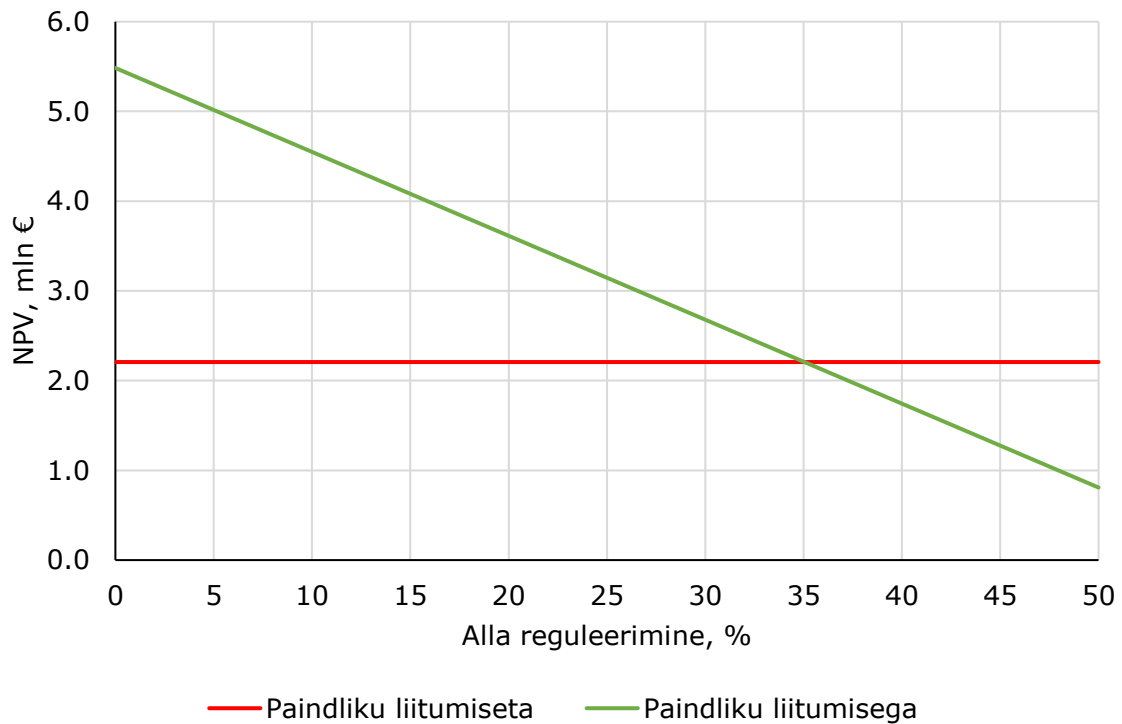
$$K_{WN} = P_{WN} \cdot I_{pWN} + E_{WN} \cdot I_{mWN} = 5 \cdot 14\,000 + 12\,702 \cdot 1,5 = 89\,053 \text{ (€)} \quad (5.4)$$

$$F_{kWN} = T_{WN} - K_{WN} = 507\,508 - 89\,053 = 418\,455 \text{ (€)} \quad (5.5)$$

kus C_{WN} – tuuleelektrijaama kasutustegur;

z – osa aastast, millal rakendatakse alla reguleerimist.

Järgnevalt arvatati avaldisega 5.6 iga olukorra ja juhtumi puhul puhasnüüdisväärtus. Projekti elueaks määrati 25 aastat ja diskontomääraks 5%. Kokkuvõtlikud tulemused on esitatud joonisel 5.24.



Joonis 5.24 Puhasnüüdisväärtus projekti eluea lõpus

Joonisel 5.24 on punasega esitatud olukord, kui paindliku liitumise võimalust ei kasutata. Rohelisega on esitatud puhasnüüdisväärtus, kui igal aastal rakendatakse alla reguleerimist, kas 0...45% või 50% aastast. Tulemustest selgub, et paindliku liitumise võimaluse kasutamine on võrreldes selle mitte kasutamisega tasuv kui alla reguleerimist rakendatakse vähem kui 35% aastast. Tõenäosust, et 25 aasta vältel rakendatakse alla reguleerimist igal aastal 35% peetakse madalaks, sest energia tootmine on terve aasta peale hajutatud. Seega on lõputöö autori arvates paindliku liitumise võimaluse kasutamine ehk ka liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimine tööstuskontrolleriga õigustatud.

5.6.3 Reaktiivenergia tasude vähendamine

Eelnevalt uuriti terve projekti tasuvust, kuid rakendatakse lõputöös koostatud juhtalgoritme. Edasiselt keskendutakse ettevõtte elektrivõrgu kulude vähendamisele ja tööstuskontrolleri tasuvusele. Reaktiivenergia tasude vähendamine tuleneb liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse reguleerimise võime lisamisest. Elering AS on sätestanud ülekandevõrgu operaatorile mitte juhitava reaktiivvõimsuse tasu 1,54 €/Mvarh [58], mis kehtib nii ülekandevõrku suunatava kui ka sealt tarbitava reaktiivenergia kohta. Lõputöös vaadeldi liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse vähendamise mõju Elering AS-ile makstavale tasule arvestades käsitletava elektrivõrgu

maksimaalse reaktiivkoormusega ligikaudu 6 Mvar. Tabelis 5.3 on esitatud liitumispunkti läbiv reaktiivvõimsus, aastane reaktiivenergia hulk ja selle maksumus.

Tabel 5.3 Liitumispunkti läbiv reaktiivvõimsus, aastane reaktiivenergia hulk ja selle maksumus

Reaktiivvõimsus, Mvar	Aastane reaktiivenergia, Mvarh	Maksumus, €
6	52 560	80 942
5	43 800	67 452
4	35 040	53 962
3	26 280	40 471
2	17 520	26 980
1	8 760	13 490
0	0	0

Tabelist 5.3 selgub, et igas tunnis liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse vähendamine 1 Mvar võrra vähendab aastaseid reaktiivenergia tasusid 13 490 euro võrra. Lõputöös kasutatud tööstuskontroller National Instruments CompactRIO maksumus koos pingeväljundmoodulitega on ligikaudu 6 000 eurot [46] ja koos paigaldusega võiks lahenduse maksumus olla vahemikus 10 000...15 000 eurot. Seega on kontrolleri tasuvusaeg ligikaudu üks aasta. Arvestades, et töös kasutatud tootmisüksustega on võimalik katta terve elektrivõrgu reaktiivkoormus koos reaktiivvõimsuskadudega, on võimalik aastas vähendada reaktiivenergia tasusid 80 942 euro võrra, mis vähendab tööstuskontrolleri tasuvusaega märkimisväärselt.

5.6.4 Katkestustest põhjustatud kulude vähendamine

Elektrikatkestustest põhjustatud kulude vähendamine on seotud saartalitluse võime lisamisega. Kulude määramisel peab arvestama tööstustarbijate kahjudega, mis tekivad tootmisprotsessi seiskumise tulemusena tootmata jäänud toodangust, praagi tekkimisest jm. Allika [59] alusel on tööstustarbijate puhul katkestustest põhjustatud kahju 4 030 €/MWh. Lõputöö jaotises 5.3 esitatud sünkroongeneraatoriga saartalitluse katse alusel oli elektrivõrgu koormus enne saartalitlust ligikaudu 18,3 MW, mis tähendab, et katkestuse puhul oleks kahju ligikaudu 74 000 €/h. Saartalitluse tekkimise käigus vähendati koormust ligikaudu 3% ehk 0,55 MW, mistõttu oleksid kahjud 2 200 €/h. Seega vähendab saartalitluse võime lisamine katkestustest põhjustatud kulusid eelneva näite põhjal 71 800 €/h võrra. Lisaks katkestusaja pikkusele tuleb arvestada ka tootmisprotsesside käivitamise ajaga, mis võib suurendada tarbijate kulusid veelgi. Seega oleks vastavate juhtalgoritmidega tööstuskontrolleri tasuvusaeg eelneva näite korral alla ühe tunni.

KOKKUVÕTE

Lõputöö eesmärgiks oli välja töötada juhtalgoritmid, mis võimaldaksid elektripaigaldisel pakkuda süsteemiteenuseid, reguleerida liitumispunkti läbivaid võimsusvooge ja tagada elektrivõrgu saartalitluse võime. Lahendus võimaldab vähendada elektripaigaldise investeeingu- ja käidukulusid ning tõsta selle lisandväärtust.

Juhtalgoritmid koostati ühe Eesti tööstusettevõtte elektrivõrgu alusel, mida modelleeriti elektrisüsteemi reaajasimulaatoril RTDS. Ettevõtte elektrivõrk koosneb uuest ja vanast võrguosast, mis plaanitakse omavahel ühendada. Uues võrguosas olev sünkroongeneraator ei suuda katta mõlema võrguosa koormus, mistõttu kaalutakse tootmisvõimsuse lisamist. Elektrivõrgu mudelit täiendati perspektiivsete tootmisüksustega: päikeseelektrijaam, akupank ja tuuleelektrijaam. Elektrivõrgu ja tootmisüksuste mudeleid kirjeldati jaotistes 3.2...3.6. Aktiiv- ja reaktiivvõimsuste jaotamiseks tootmisüksuste vahel koostati võrdelise, järjestikulise ja proportsionaalse jaotusviisi matemaatilised kriteeriumid, mida selgitati jaotises 3.7.

Juhtalgoritme arendati kahes etapis – esmalt koostati võimalikud lahendused reaajasimulaatoril. Määrati juhtalgoritmide tööks vajalikud sisendid. Koostati abisüsteemid, millega valitakse õiged juhtalgoritmid, määratakse elektrivõrgu minimaalne ja maksimaalne pinge, tuvastatakse töös olevad tootmisüksused ja arvutatakse minimaalsed ja maksimaalsed reguleerimisvõimsused. Töötati välja juhtalgoritmides kasutatavad regulaatorid ja loogikalülitused. Regulaatoreid ja loogikalülitusi kasutati liitumispunkti läbivate aktiiv- ja reaktiivvõimsusvoogude ning sünkroongeneraatoriga ja sünkroongeneraatorita saartalitluse reguleerimisloogika ülesehitamiseks. Reaajasimulaatoril koostatud juhtalgoritme selgitati jaotises 3.8. Tulenevalt süsteemiteenuste pakkumise juhtalgoritmide ülesehituse keerukusest neid reaajasimulaatoril ei modelleeritud.

Reaajasimulaatori juhtalgoritmide rakendamine ei võta arvesse sideviiteid ja muid riistvaralisi piiranguid juhtalgoritmide ja juhivate seadmete vahel. Seega jätkati juhtalgoritmide arendamist tööstuskontrolleril National Instruments CompactRIO. Määrati reaajasimulaatori ja tööstuskontrolleri vahel edastatavad andmed ja koostati katsestend, mida kirjeldati jaotises 4.2. Koostati funktsioonid IEC 61850 GOOSE sõnumite vastuvõtmiseks ja analoogpingete väljastamiseks. Viidi reaajasimulaatoris välja töötatud lahendused üle tööstuskontrollerile. Konstrueeriti sageduse ja pingega seotud süsteemiteenuste pakkumist võimaldavad juhtalgoritmid. Tööstuskontrolleril koostatud juhtalgoritmide ülesehitust ja põhimõtteid selgitati jaotises 4.3.

Liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse reguleerimiseks kasutati aktiivvõimsuse järjestikulist jaotamist. Tootmisüksuste reguleerimise järjekord määrati põhiliselt nende muutuvkulude alusel. Liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse reguleerimiseks koostati juhtalgoritmid võrdeliseks, järjestikuliseks ja proportsionaalseks reguleerimiseks. Saartalitusel kasutati sageduse reguleerimiseks tootmisüksuste aktiivvõimsuste järjestikulist reguleerimist. Reguleerimise järjekord määrati tootmisüksuste reguleerimiskiiruste alusel. Pinge reguleerimiseks kasutati tootmisüksuste reaktiivvõimsuste võrdelist reguleerimist. Sagedusega seotud süsteemiteenuste pakkumisel kasutati tootmisüksuste reservvõimsuste käivitamiseks proportsionaalset reguleerimist. Regulaatorid koostati nii, et tagatud oleks lineaarne reguleerimine. Pingega seotud süsteemiteenuste pakkumiseks täiendati liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse regulaatorit nii, et oleks võimalik reguleerida ka pinget ja liitumispunkti võimsustegurit ning pakkuda kiire reaktiivvoolu sisestuse teenust. Tööstuskontrolleri juhtalgoritmide tööd testiti katseliselt.

Esimesena katsetati liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse juhtalgoritmide tööd üles ja alla reguleerimisel. Katsete tulemused esitati jaotises 5.1. Selgus, et tootmisüksuste aktiivvõimsuste ja aktiivkoormuste reguleerimist alustati õiges järjekorras, piirvõimsusi ei ületatud ja reguleerimise eesmärgid täideti täpselt nii üles kui ka alla reguleerimisel. Samas tekkis tootmisüksuste aktiivvõimsuste muutuste ajaline kattuvus, mida mõjutas liitumispunkti läbiva aktiivvõimsuse regulaatori kiirus ja reguleerimise ulatus.

Teisena testiti liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse juhtalgoritmide tööd. Uuriti reaktiivvõimsuse võrdelist, järjestikulist ja proportsionaalset jaotamist. Võrdelisel reguleerimisel teostati võrdlev katse reaajasimulaatori juhtalgoritmiga. Katsete tulemused esitati jaotises 5.2. Katsete tulemustest selgus, et reguleerimiste eesmärgid täideti. Võrdelisel reguleerimisel olid reguleerimisperioodi lõpuks tootmisüksuste reaktiivvõimsused võrdsed ja liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse muutuses ei esinenud ajalisi viiteid (joonis 5.4). Võrdlev katse näitas, et aeglaste protsesside korral on tööstuskontrolleri juhtalgoritmi toime võrdne ideaalsetes tingimustes töötava reaajasimulaatori juhtalgoritmi toimega (joonis 5.5). Selgus, et ühe tootmisüksuse reaktiivvõimsuse piiri saavutamine reguleerimisprotsessi vältel ei mõjuta teiste tootmisüksuste reaktiivvõimsuste võrdse lõppseisu saavutamist (joonis 5.6). Järjestikulisel reguleerimisel tuvastati reguleerimise õige järjekord (joonised 5.7 ja 5.8), kuid leiti, et reguleerimisprotsessi lõpus võivad osad tootmisüksused reaktiivvõimsust tarbida ja ülejäänud üksused seda toota (joonis 5.8). Proportsionaalsel reguleerimisel leiti, et reguleerimise eesmärgi täitmisel toodavad või tarbivad kõik tootmisüksused võrdse protsendi enda reaktiivvõimsuse piirist (joonis 5.9).

Järgnevalt uuriti juhtalgoritmide tööd sünkroongeneraatoriga ja sünkroongeneraatorita saartalitluse tekkimisel. Sünkroongeneraatoriga saartalitluse tekkimisel teostati võrdlev katse reaajasimulaatori juhtalgoritmidega. Katsete tulemused esitati jaotises 5.3. Selgus, et elektrivõrgu stabiilne töö on saartalitluse tekkel võimalik tagada. Võrdlev katse näitas, et tööstuskontrolleri juhtalgoritmiga esines sügavam sageduslohk ning tootmisüksuste aktiiv- ja reaktiivvõimsustes esines rohkem võnkumisi. Sageduslohu sügavuse erinevust võib põhjustada sideviide reaajasimulaatori ja kontrolleri vahel, millega peab ka elektrivõrgu juhtimisel arvestama. Võnkumisi põhjustas eeldatavasti asjaolu, et regulaatorite parameetreid ei ole võimalik täpselt samaks seadistada ja kontrolleri regulaatorid olid tugevatoimelisemad. Sünkroongeneraatorita saartalitluse katsest selgus, et akupangaga, mille juhtimissüsteemis olid vastavad juhtahelad, oli võimalik vältida ettevõtte elektrivõrgu kustumist.

Neljandana teostati sagedusega seotud süsteemiteenuste katsed. Näidati sageduse reservide käivitamist ja peatamist erinevates olukordades. Katsete tulemused esitati jaotises 5.4. Selgus, et reservid käivitati ja peatati ajalise viiteta, tootmisüksuste aktiivvõimsused muutusid lineaarselt ning nendes ei esinenud üle- ega alavõnkeid. Näidati, et kiire sageduse reageeringu süsteemiteenuse pakkumine akupanga ja päikeseelektrijaamaga on võimalik.

Pingega seotud süsteemiteenuste katsete tulemused esitati jaotises 5.5. Esimesena uuriti reaktiivvõimsuse reguleerimist kui reguleerimise ajal saavutati pinge ülemine piir. Selgus, et tuule- ja päikeseelektrijaama ning akupanga reaktiivvõimsuste muutused peatati kohe, kui tuvastati pinge ülemise piiri saavutamine. Samas oli sünkroongeneraatori reaktiivvõimsuse regulaator aeglasem kui liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse regulaator, mille väljundi tõus peatati. Seega tõusis generaatori reaktiivvõimsus peale reguleerimise peatamist teistega võrdsele tasemele, mis põhjustas pinge tõusu üle määratud piiri. Olukorra lahendamiseks määrati madalam pinge piir. Lisaks näidati, et juhtalgoritmidega on võimalik täpselt reguleerida pinget ja liitumispunkti võimsustegurit. Samas leiti, et võimsusteguri otsesel reguleerimisel on reguleerimise algus kiire ja lõpp aeglane.

Jaotises 5.6 uuriti koostatud juhtalgoritmide majanduslikku mõju. Uuriti sagedusega seotud süsteemiteenuste pakkumise tasuvust akupangaga. Koostati neli stsenaariumi, kus akupank osutas süsteemiteenuseid 100, 75, 50 ja 25% aastast. Leiti, et projekt on majanduslikult tasuv vastavalt kolme, nelja, kuue või 13 aastaga. Analüüsi paindliku liitumise tasuvust, mida võimaldab liitumispunkti läbivate võimsusvoogude reguleerimine. Selgus, et paindliku liitumise kasutamine on projekti 25 aastase eluea

vältel tasuv kui alla reguleerimist rakendatakse vähem kui 35% aastast. Uuriti liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse minimeerimisega kaasnevat reaktiivenergia tasude vähenemist. Leiti, et igas tunnis liitumispunkti läbiva reaktiivvõimsuse vähendamine 1 Mvar võrra vähendab Elering AS-ile makstavaid tasusid 13 490 euro võrra aastas ja seega on kontrolleri tasuvusaeg ligikaudu üks aasta. Arvestades, et lõputöös kasutatud tootmisüksustega on võimalik katta kogu elektrivõrgu reaktiivkoormus ja reaktiivvõimsuskao, väheneb kontrolleri tasuvusaeg märkimisväärselt. Viimasena uuriti katkestustest põhjustatud tasude vähenemist, mida võimaldab saartalitluse võime. Jaotises 5.3 esitatud katse tulemuste põhjal leiti, et kontrolleri tasuvusaeg on alla ühe tunni.

Lõputöö tulemuseks on juhtalgoritmid, mida tööstuskontrolleriga rakendades on võimalik kasutada reaalse elektripaigaldise tootmisüksuste juhtimiseks süsteemiteenuste pakkumisel, liitumispunkti läbivate võimsusvoogude reguleerimisel ja saartalitluse juhtimisel. Samuti on välja töötatud juhtalgoritme võimalik kohandada ja rakendada neid ka teiste sarnaste elektripaigaldiste juhtimiseks.

Lõputöö jätkuks võiks uurida sagedusega seotud süsteemiteenuste pakkumiseks koostatud regulaatorite kasutusvõimalust liitumispunkti läbivate võimsusvoogude reguleerimiseks ja saartalitluse juhtimiseks. See võimaldaks täpsemalt määrata reguleerimise kiirust ja saavutada reguleeritavate parameetrite lineaarsemad muutused. Samuti peaks täiendama RSCAD-i elektrituuliku mudelit nii, et võrgupoolse sagedusmuunduriga oleks võimalik reguleerida aktiivvõimsust eraldi elektrituuliku generaatori aktiivvõimsusest. Viimaseks tuleks teostada täpsem majanduslik analüüs süsteemiteenuste pakkumise ning tuule- ja päikeseelektrijaamade tasuvusest.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Majandus- ja kommunikatsiooniministeerium, „Eesti riiklik energia- ja kliimakava aastani 2030,“ 03.12.2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.mkm.ee/et/eesmargid-tegevused/energeetika/eesti-riiklik-energia-ja-kliimakava-aastani-2030>. [Kasutatud 22.04.2021].
- [2] Majandus- ja kommunikatsiooniministeerium, „Arengukavad,“ 17.02.2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.mkm.ee/et/eesmargid-tegevused/arengukavad>. [Kasutatud 22.04.2021].
- [3] ENTSO-E, „Market Committee,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.entsoe.eu/about/market/>. [Kasutatud 17.03.2020].
- [4] Elering AS, „Süsteemiteenused,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://elering.ee/susteemiteenused>. [Kasutatud 29.01.2020].
- [5] E. Unamuno, J. Paniagua ja J. A. Barrena, „Unified Virtual Inertia for ac and dc Microgrids: And the Role of Interlinking Converters,“ *IEEE Electrification Magazine*, kd. 7, nr 4, pp. 56-68, 2019.
- [6] Elering AS, AS "Augstsprieguma tikls", LITGRID AB, „Baltic Load-Frequency Control block concept document,“ 2020.
- [7] J. Ehnberg *et al*, „Categorisation of Ancillary Services for Providers,“ *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, kd. 56, nr 1, pp. 3-20, 2019.
- [8] M. Meldorf ja J. Kilter, *Elektrisüsteemi stabiilsus*, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2011.
- [9] B. Heimisson, *Improved frequency control strategies for geothermal power plants*, Göteborg: Chalmers University of Technology, 2014.
- [10] J. Merino *et al*, *Ancillary service provision by RES and DSM connected at distribution level in the future power system*, SmartNet, 2016.
- [11] I. Palu *et al*, *Reaktiivvõimsuse kompenseerimine Eesti elektrisüsteemis*, Tallinn: TTÜ Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut, 2017.
- [12] C. S. Demoulias *et al*, „Ancillary Services Offered by Distributed Renewable Energy Sources at the Distribution Grid Level: An Attempt at Proper Definition and Quantification,“ *Applied Sciences*, kd. 10, nr 20, 2020.

- [13] EirGrid and SONI, DS3 System Services: Portfolio Capability Analysis, 2014.
- [14] Fingrid Oy, „Fast Frequency Response,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.fingrid.fi/en/electricity-market/reserves_and_balancing/fast-frequency-reserve/#technical-requirements. [Kasutatud 27.01.2021].
- [15] J. Matevosyan *et al*, „Proposed Future Ancillary Services in Electric Reliability Council of Texas,” *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*, Eindhoven, 2015.
- [16] K. Oureilidis *et al*, „Ancillary Services Market Design in Distribution Networks: Review and Identification of Barriers,” *Energies*, kd. 13, nr 4, 2020.
- [17] G. Migliavacca *et al*, „Ancillary services from distributed energy sources for a secure and affordable European system: main results from the SmartNet projects,” International Smart Grid Action Network (ISGAN), 2019.
- [18] A. Rosin *et al*, „Tarbimise juhtimine - suurtarbijate koormusgraafikute salvestamine ning analüüs tarbimise juhtimise rakendamise võimaluste tuvastamiseks,” Elering AS, Tallinn, 2014.
- [19] Elering AS, Eesti elektrisüsteemi varustuskindluse aruanne 2020, Tallinn: Elering AS, 2020.
- [20] K. Janson ja A. Kallaste, Elektrimasinate alused, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2017.
- [21] P. Kundur, Power System Stability and Control, New York: McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [22] Danish Energy Agency ja Energinet, „Technology Data for Generation of Electricity and District Heating,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ens.dk/en/our-services/projections-and-models/technology-data/technology-data-generation-electricity-and>. [Kasutatud 01.03.2021].
- [23] J. Aho *et al*, „Active Power Controls form Wind Power: Bridging the Gaps,” National Renewable Energy Laboratory, Denver, 2014.
- [24] M. Singh ja S. Santoso, „Dynamic Models for Wind Turbines and Wind Power Plants,” National Renewable Energy Laboratory, Denver, 2011.
- [25] A. G. Abo-Khalil, „Impacts of Wind Farms on Power System Stability,” *Modeling and Control Aspects of Wind Power Systems*, IntechOpen, 2013.

- [26] T. Mercier, Participation of Wind Turbine Generators to Voltage Control in Power Systems, Louvain-la-Neuve: Louvain School of Engineering, 2013.
- [27] N. S. Stoltenborg, "Investigation of applying grid-forming converter control on wind turbines and its influence on power systems", [Magistritöö], Department of Energy Technology, Aalborg University, Aalborg, Taani, 2020.
- [28] Y. Yin, M. Liao ja P. Lyu, „The Dynamic Stability Analysis of Wind Turbines under Different Control Strategies,” *2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, Changsha, China, 2015.
- [29] A. S. Saidi, „Impact of large photovoltaic power penetration on the voltage regulation and dynamic performance of the Tunisian power systems,” *Energy Exploration & Exploitation*, kd. 38, nr 5, pp. 1774-1809, 2020.
- [30] M. M. Aly *et al*, „Assessment of reactive power contribution of photovoltaic energy systems on voltage profile and stability of distribution systems,” *Electrical Power and Energy Systems*, kd. 61, pp. 665-672, 2014.
- [31] A. Cabrera-Tobar ja O. Gomis-Bellmunt, „Dynamic study of a Photovoltaic power plant interconnected with the grid,” *2016 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, Ljubljana, 2016.
- [32] A. Cabrera-Tobar *et al*, „Active and Reactive Power Control of a PV Generator for Grid Code Compliance,” *Energies*, kd. 12, nr 20, 2019.
- [33] I. Alotaibi *et al*, „A Comprehensive Review of Recent Advances in Smart Grids: A Sustainable Future with Renewable Energy Resources,” *Energies*, kd. 13, nr 23, 2020.
- [34] IRENA, Electricity Storage Valuation Framework: Assessing system value and ensuring project viability, Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2020.
- [35] Y. Z. Zhang, „Battery energy storage operation with adaptive droop control,” *2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, Maui, 2017.
- [36] Danish Energy Agency ja Energinet, „Technology Data for Energy Storage,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ens.dk/en/our-services/projections-and-models/technology-data/technology-data-energy-storage>. [Kasutatud 01.03.2021].

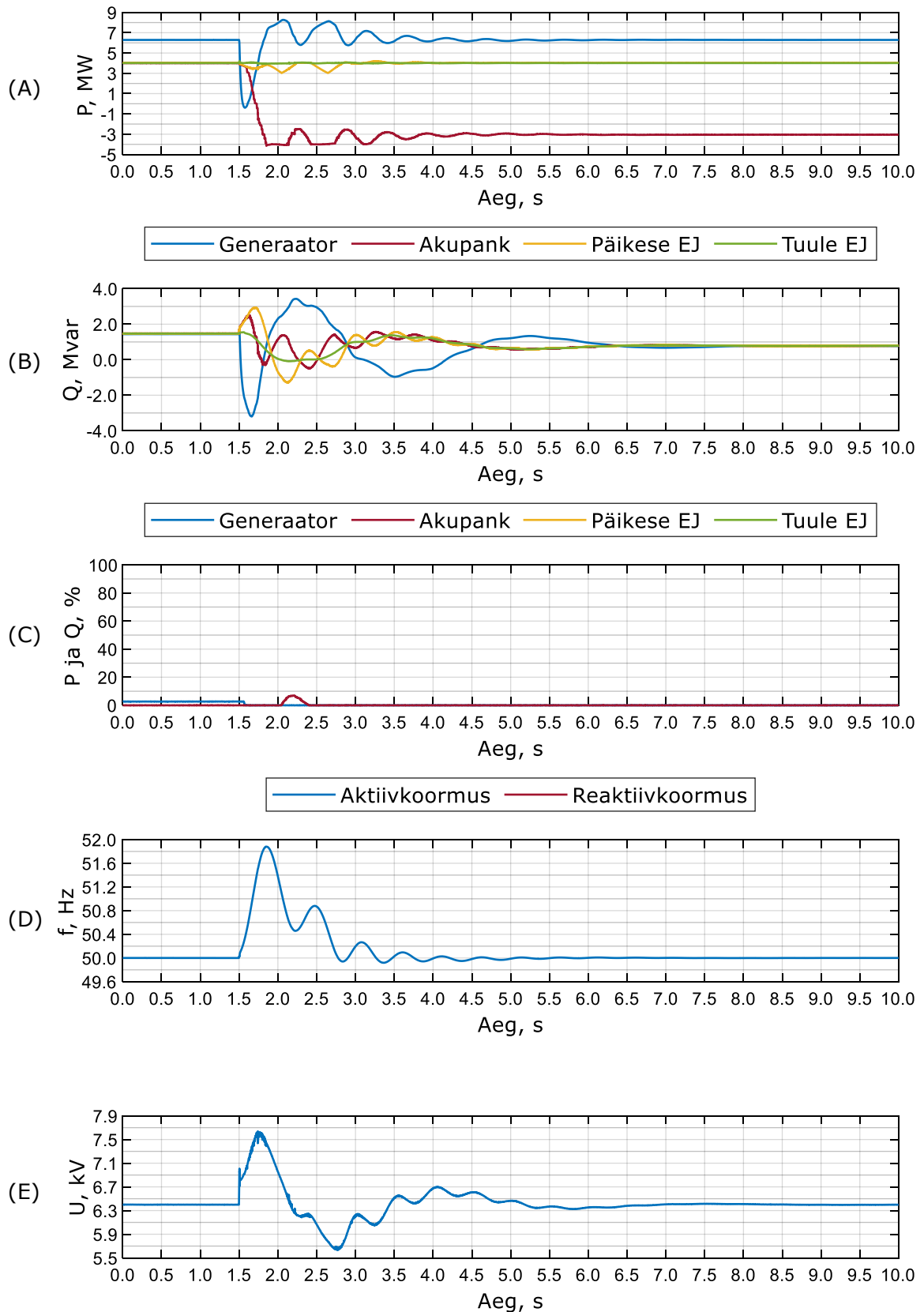
- [37] H. C. Hesse *et al*, „Lithium-Ion Battery Storage for the Grid - A Review of Stationary Battery System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids,” *Energies*, kd. 10, nr 12, 2017.
- [38] M. Eremia, C.-C. Liu ja A.-A. Edris, „Power Semiconductor Devices for HvdC and Facts Systems,” *Advanced Solutions in Power Systems: HVDC, FACTS, and Artificial Intelligence*, John Wiley & Sons, Inc., 2016, pp. 11-34.
- [39] M. Eremia, C.-C. Liu ja A.-A. Edris, „VSC-HVDC Transmission,” *Advanced Solutions in Power Systems: HVDC, FACTS, and Artificial Intelligence*, John Wiley & Sons, Inc., 2016, pp. 125-267.
- [40] RTDS Technologies Inc., RTDS Hardware manual, 2009.
- [41] Maa-amet, „X-GIS 2.0 [maainfo],” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/maainfo>. [Kasutatud 22.02.2021].
- [42] Ü. Treufeldt, Lühised elektrisüsteemides, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool Elektroenergeetika instituut, 2002.
- [43] „IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies,” *IEEE Std 421.5-2016 (Revision of IEEE Std 421.5-2005)*, pp. 1-207, 2016.
- [44] G. Andreesen, "Elektrijaama generaatorite reaktiivvõimsuste juhtimissüsteemi arendamine ja selle katsetamine reaajasimulaatoriga", [Magistritöö], Inseneriteaduskond, TalTech, Tallinn, Eesti, 2020.
- [45] M. Müür, E. Pettai ja U. Lepiksoo, Programmeeritavad kontrolleriid tööstusautomaatikas, Tallinn, 2011.
- [46] National Instruments, „CompactRIO Systems,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ni.com/en-us/shop/compactrio.html>. [Kasutatud 01.04.2021].
- [47] National Instruments, „CompactRIO Controller,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ni.com/en-us/shop/hardware/products/compactrio-controller.html>. [Kasutatud 01.04.2021].
- [48] National Instruments, „C Series Voltage Input Module,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ni.com/en-us/shop/hardware/products/c-series-voltage-input-module.html>. [Kasutatud 01.04.2021].

- [49] National Instruments, „C Series Voltage Output Module,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ni.com/en-us/shop/hardware/products/c-series-voltage-output-module.html>. [Kasutatud 01.04.2021].
- [50] RTDS Technologies Inc., „GTIO Cards,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <file:///C:/Users/hendr/AppData/Local/Temp/GTIO%20Cards.pdf>. [Kasutatud 26.04.2021].
- [51] Elering AS, „Vabad võimsused,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://elering.ee/vabad-voimsused>. [Kasutatud 03.05.2021].
- [52] Fingrid Oy, „Frequency containment reserves (FCR-N, FCR-D), transactions in the hourly and yearly markets,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.fingrid.fi/en/electricity-market/electricity-market-information/reserve-market-information/frequency-controlled-disturbance-reserve/>. [Kasutatud 03.05.2021].
- [53] Nord Pool AS, „Day-ahead prices,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/EE/Yearly/?view=table>. [Kasutatud 03.05.2021].
- [54] K. Kopelman, "Lokaalsete elektri- ja soojusenergia koostootmistehnoloogiate majanduslik analüüs tööstuspargi näitel", [Magistritöö], Elektroenergeetika teaduskond, TTÜ, Tallinn, Eesti, 2016.
- [55] WindEurope asbl/vsw, „Wind energy in Europe 2020 Statistics and the outlook for 2021-2025,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-in-2020-trends-and-statistics/>. [Kasutatud 03.05.2021].
- [56] Elering AS, „Toodang ja prognoos,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://elering.ee/toodang-ja-prognoos>. [Kasutatud 03.05.2021].
- [57] Eesti Energia AS, „Päikesepaneelid,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.energia.ee/et/era/taastuenergia/paikesepaneelid>. [Kasutatud 03.05.2021].
- [58] Elering AS, „Võrguteenus,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://elering.ee/vorguteenus>. [Kasutatud 03.05.2021].
- [59] H. Manninen, J. Kilter ja M. Landsberg, „Advanced Methodology for Estimation of Value of Lost Load (VOLL) Using Equipment Specific Health Indices,” *2019 Electric*

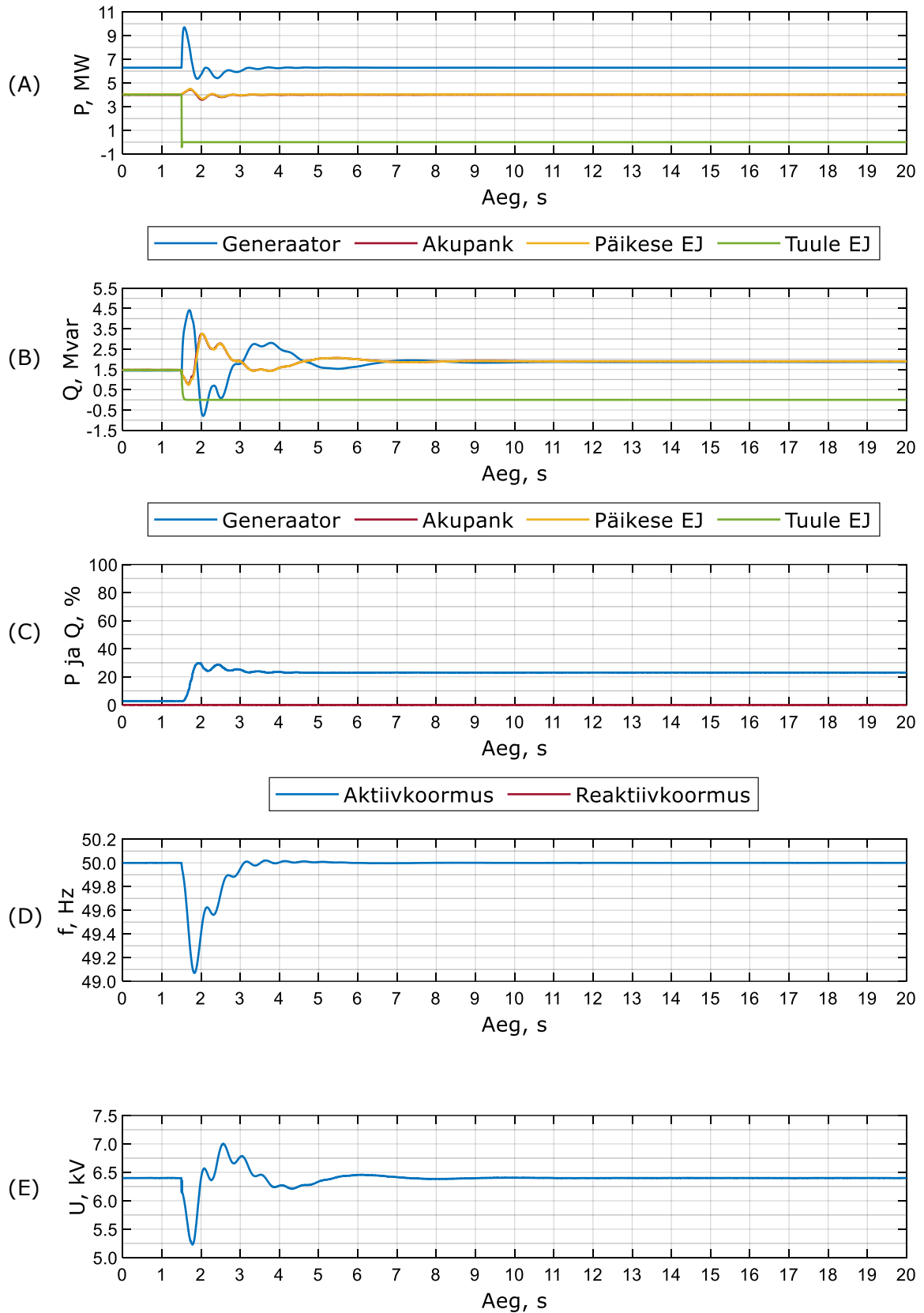
Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ) & 2019 Symposium on Electrical Engineering and Mechatronics (SEEM), 2019.

LISAD

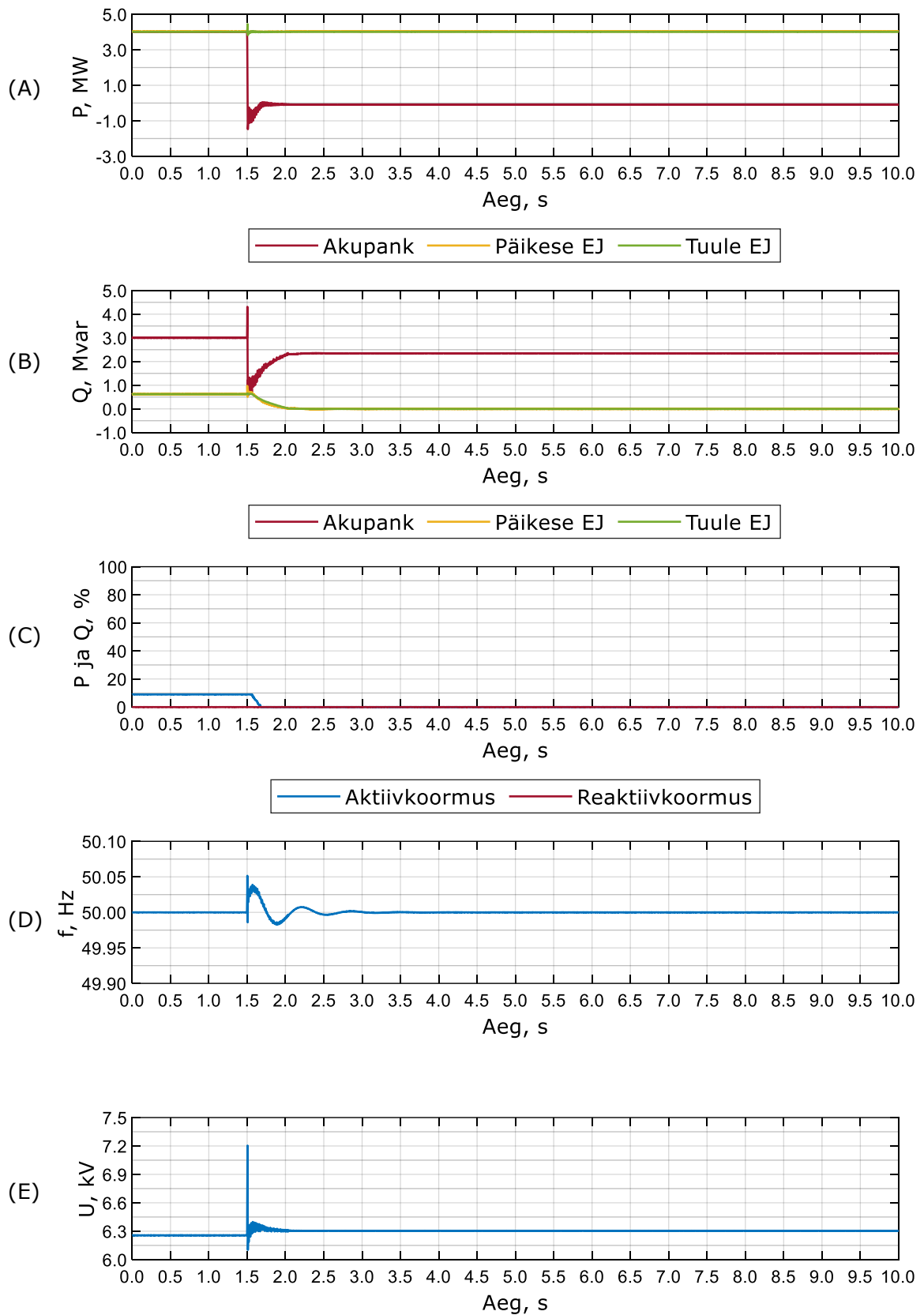
Lisa 1 Saartalitluse lisakatsete tulemused



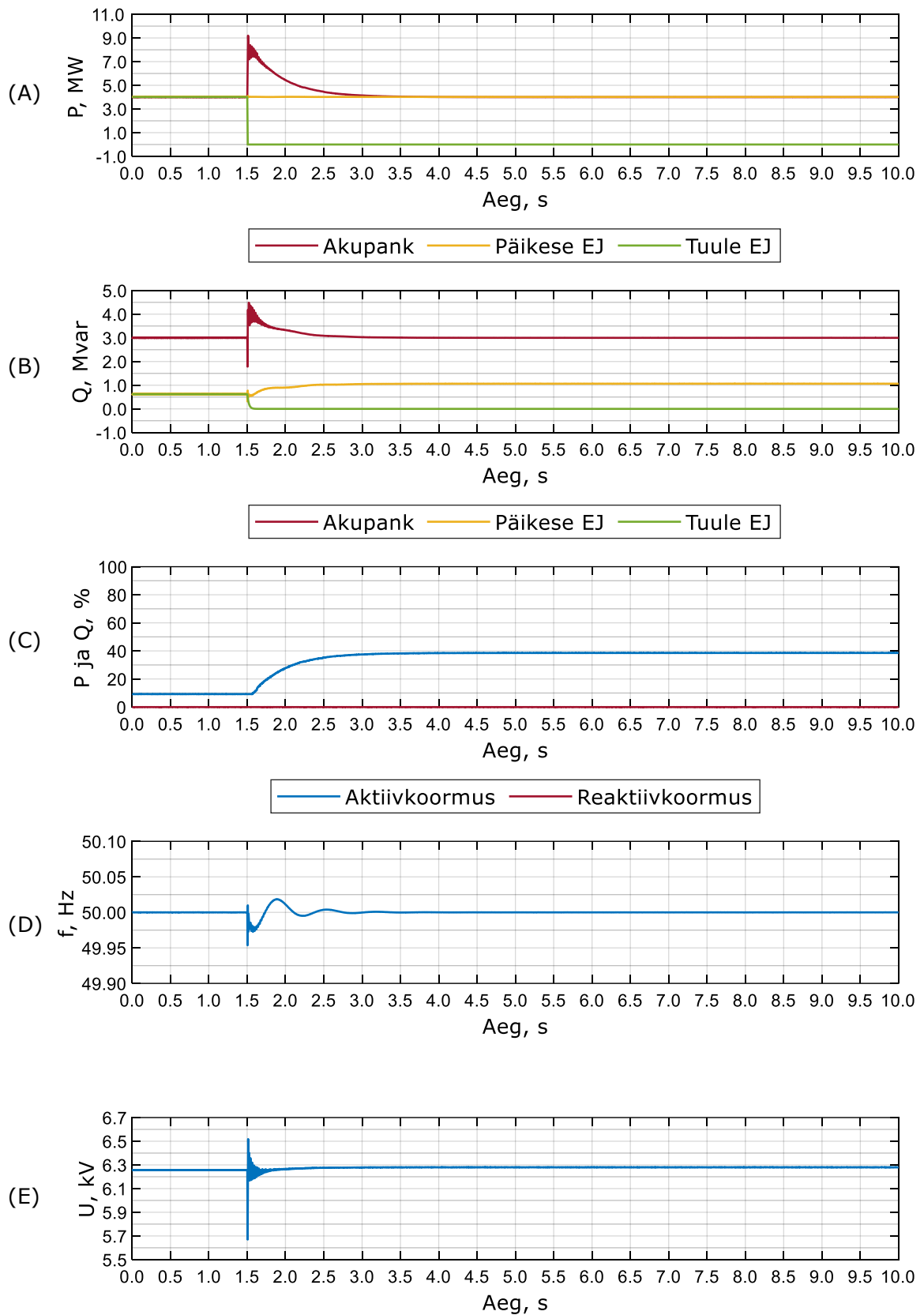
Joonis L1.1 Sünkroogeneraatoriga saartalitlusel suurima koormuse välja lülitumine. A – tootmisüksuste aktiivvõimsused, B – tootmisüksuste reaktiivvõimsused, C – koormuse vähendamise protsent, D – elektrivõrgu sagedus, E – alajaama AJ1 teise sektsiooni pinge



Joonis L1.2 Sünkroongeneraatoriga saartalitlusel tuuleelektrijaama välja lülitumine. A – tootmisüksuste aktiivvõimsused, B – tootmisüksuste reaktiivvõimsused, C – koormuse vähendamise protsent, D – elektrivõrgu sagedus, E – alajaama AJ1 teise sektsiooni pinge



Joonis L1.3 Sünkroogeneraatorita saartalitlusel suurima koormuse välja lülitumine. A – tootmisüksuste aktiivvõimsused, B – tootmisüksuste reaktiivvõimsused, C – koormuse vähendamise protsent, D – elektrivõrgu sagedus, E – alajaama AJ1 teise seksiooni pinge



Joonis L1.4 Sünkroongeneraatorita saartalitlusel tuuleelektrijaama välja lülitumine. A – tootmisüksuste aktiivvõimsused, B – tootmisüksuste reaktiivvõimsused, C – koormuse vähendamise protsent, D – elektrivõrgu sagedus, E – alajaama AJ1 teise sektsiooni pinge