



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**ANDMESIDE AEGVIIDETE MÕJU
PÄIKESEELEKTRIJAAAMA VÕNKESUMMUTITE
TALITLUSELE**

**INFLUENCE OF SOLAR POWER PLANT COMMUNICATION
DELAYS ON THE PERFORMANCE OF THE PLANT'S
POWER OSCILLATION DAMPING CONTROL**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Anne Niin

Üliõpilaskood:: 221545AAAM

Juhendajad: Jako Kilter, elektrisüsteemide
professor
Tanel Sarnet, elektrisüsteemi
dünaamika ekspert

(Tiitellehe pöördel)

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.

“13.” mai 2025

Autor: Anne Niin

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“13.” mai 2025

Juhendaja: Jako Kilter

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

“.....”20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Anne Niin

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Andmeside aegviidete mõju päikeseelektrijaama võnkesummutite talitlusele“,

mille juhendaja on Jako Kilter ja kaasjuhendaja Tanel Sarnet

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.

13. mai 2025 (kuupäev)

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.

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Anne Niin, 221545AAAM
Õppekava, peeriala: AAAM02/22, Energiamuundus- ja juhtimissüsteemid
Juhendaja(d): Jako Kilter (professor, 6203765),
Tanel Sarnet (elektrisüsteemi dünaamika ekspert, 6203753)

Lõputöö teema:

(eesti keeles) *Andmeside aegviidete mõju päikeseelektrijaama võnkesummutite talitlusele*

(inglise keeles) *Influence of Solar Power Plant Communication Delays on the Performance of the Plant's Power Oscillation Damping Control*

Lõputöö põhieesmärgid:

Lõputöö eesmärgiks on analüüsida päikeseelektrijaama juhtimissüsteemi talitlust ja välja töötada lahendus võimsuse võnkumise summutamise funktsiooni rakendamiseks reaalsetes juhtimissüsteemides kasutades elektrisüsteemi reaalajasimulaatorit RTDS.

- Määratleda missugune päikeseelektrijaamades kasutatava juhtimisloogika meetod oleks kõige mõistlikum kiiresti reageeriva ja stabiilse süsteemi tagamiseks.
- Analüüsida päikeseelektrijaama juhtimissüsteemi ajalisi viiteid mõõteandmete lugemisel ja edastamisel.
- Välja töötada võimsuste võnkumise summutamise funktsioon ja analüüsida selle rakendamist reaalsetes päikeseelektrijaamade juhtimissüsteemides.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	RSCAD tarkvaraga ja RTDS lahendustega tutvumine	20.09.2024
2.	Teemaga seotud kirjandusega tutvumine ja sissejuhatuse kirjutamine	11.11.2024
3.	Täpse metoodika välja selgitamine	25.11.2024
4.	Süsteemi modelleerimine RSCAD tarkvaraga	09.12.2024
5.	Raporti teoreetilise osa kirjutamine	31.01.2025
6.	Simulatsioonide läbi viimine laboris	31.03.2025

7.	Metoodika kirjeldus raportis	10.04.2025
8.	Tulemuste esitamine raportis ning analüüsi ja järelduste kirjutamine	03.05.2025
9.	Kokkuvõtte kirjutamine ja mustandi esitamine	10.05.2025
10.	Paranduste sisseviimine ja lõpliku versiooni esitamine	13.05.2025

Töö keel: eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "13" mai 2025 a

Üliõpilane: Anne Niin ".....".....20.....a
/allkiri/

Juhendaja: Jako Kilter ".....".....20.....a
/allkiri/

Konsultant: ".....".....20.....a
/allkiri/

Programmijuht: Toomas Vaimann ".....".....20.....a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÖNA	8
Lühendite ja tähiste loetelu	9
SISSEJUHATUS	11
1 KIRJANDUSE TEOREETILINE ÜLEVAADE.....	15
1.1 Elektrisüsteemi stabiilsus	15
1.1.1 Generaatori diferentsiaalvõrrandid	15
1.1.2 Staatilise stabiilsuse matemaatiline kriteerium	16
1.1.3 Olekuruum	17
1.1.4 Dünaamiline stabiilsus	19
1.2 Päikeseelektrijaama juhtsüsteemid	19
1.2.1 Pingelähtega vaheldi	19
1.2.2 Vaheldi matemaatiline esitus	20
1.2.3 Päikeseelektrijaama juhtsüsteemi komponendid	22
1.2.4 Sätteväärtusepõhine juhtimine	25
1.2.5 Sagedustundliku juhtimise rakendamine võrguinverterites	25
1.3 Võnkumiste summutamine elektrisüsteemis	26
1.3.1 Vönkesummutite klassifikatsioon	26
1.3.2 Muunduripõhiste vönkesummutite (POD) ülesehitus.....	27
1.3.3 Vönkesummutite disain võrguinverterite jaoks	28
1.4 Päikeseelektrijaama andmeside	29
1.4.1 Side liitumispunkti ja inverterite vahel	29
1.4.2 Andmeside aegviide	31
1.4.3 Ülevaade andmeside aegviite kompenseerimismeetoditest	33
2 SÜSTEEMI MUDELI ÜLESEHITUS JA METOODIKA	36
2.1 Lähteandmed ja süsteemi kirjeldus.....	36
2.1.1 Elektrisüsteemi mudeli ülevaade	36
2.1.2 Päikesejaama topoloogia.....	38
2.1.3 Ekvivalentse takistuse arvutus WECC meetodil.....	40
2.1.4 Päikeseelektrijaama juhtsüsteemid	41
2.2 Juhtumiuuringu formuleerimine	42
2.2.1 Operatiivparameetrite kirjeldus.....	42

2.2.2 Süsteemi stabiilsus ilma võnkesummutita	43
2.3 Dünaamilise stabiilsuse analüüs ja võnkesummutite disain	45
2.3.1 Võnkesummuti parameetrid aegviiteta juhtsüsteemis.....	46
2.3.2 Perioodiliselt võnkuva signaali analüüs	46
2.4 Süsteemi stabiilsus võnkesummutusega	48
2.4.1 Võnkesummuti-P mõju	48
2.4.2 Võnkesummuti-Q mõju.....	50
2.4.3 Võnkesummuti-PQ mõju	51
3 VÕNKESUMMUTITE RAKENDAMINE ANDMESIDE AEGVIITEGA JUHTSÜSTEEMIS	54
3.1 Andmeside aegviite kompenseerimine	54
3.1.1 Kompenseerimine mudelist sõltumatul meetodil.....	54
3.1.2 Kompenseerimine libiseva pinna meetodil	55
3.1.3 Kompenseerimine Smith'i meetodil	56
3.2 Juhtumuuringu stsenaariumide kirjeldus	58
3.3 Aegviitega juhtsüsteemi rakendamise tulemused.....	61
3.3.1 Kompenseerimata juhtsüsteem	61
3.3.2 Mudelist sõltumatul meetodil kompenseeritud võnkesummutid	67
3.3.3 Libiseva pinna meetodil kompenseeritud summutid	74
3.3.4 Smith'i meetodil kompenseeritud võnkesummutid	79
3.3.5 Tulemuste kriitiline hinnang	82
KOKKUVÕTE	85
SUMMARY.....	88
KASUTATUD KIRJANDUS	91
LISAD	94
Lisa 1. RSCAD mudeli skeem.....	94
Lisa 2. Pääkeselektrijaama skeem	95
Lisa 3. RSCAD kasutajaliides	96

EESSÕNA

Magistritöö teema koorus välja professor Jako Kilteri algatusel suuremast projektist, mille eesmärk on välja töötada mitmesugused tehnilised lahendused seoses Eesti elektrisüsteemi jätkusuutlikkusega pärast Mandri-Euroopaga sünkroniseerimist. Teematika tundus mulle äärmiselt huvitav, kuna olen pikka aega huvitatud olnud muundurpõhiste juhtsüsteemide sügavuti uurimisest.

Sooviksin tänada Jako Kilterit, kes pakkus mulle selle teema välja, mis võimaldas mul mitte ainult tegeleda erialaste juhtsüsteemidega, vaid saada ka sissevaade elektroenergeetika maailma. Eriti sooviksin tänada kaasjuhendajat Tanel Sarnetit, kes aktiivselt toetas lõputöö projekti arengut kogu perioodi vältel ning kes vaatamata päevast või kellaajast oli alati valmis küsimustele vastama.

Lühendite ja tähiste loetelu

Lühendid

IGBT - *Insulated-Gate Bipolar Transistor*

PI – proportsionaalne integraallüli

PLL – faasilukk, faasilukustusahel (*Phase-Locked Loop*)

POD – võnkesummutus (*Power Oscillation Damping*)

POI – liitumispunkt (*Point of Interconnection*)

PPC – elektriijaama juhtseade/ juhtkontroller (*Power Plant Controller*)

MPPT – Võimsuse maksimumpunkti jälgimine (*Maximum Power Point Tracking*)

PSS – võnkesummuti (*Power System Stabilizer*)

PWM – pulsilaiusmodulatsioon (*Pulse-Width Modulation*)

RTU – kaugterminal (*Remote Terminal Unit*)

RTDS – reaajasimulaator (*Real-Time Digital Simulator*)

TCP – edastusohje protokoll (*Transmission Control Protocol*)

VSI – pingelähtega vaheldi (*Voltage Source Inverter*)

WAMS - laiseiresüsteem (*Wide-Area Measurements Systems*)

WECC - *Western Electricity Coordinating Council*

Tähtsamad tähised

ΔP_{POD} – võnkesummuti-P võimsussignaali muutus

$\Delta P_{POD}^{min}, \Delta P_{POD}^{max}$ - võnkesummuti-P minimaalne ja maksimaalne lubatud piirväärtus

ΔQ_{POD} – võnkesummuti-Q võimsussignaali muutus

$\Delta Q_{POD}^{min}, \Delta Q_{POD}^{max}$ - võnkesummuti-Q minimaalne ja maksimaalne lubatud piirväärtus

$\Delta f, \Delta \omega$ – võrgusageduse hälve

A – olekumaatriks

i_{abc} – kolmefaasilised voolutugevused

i_{dq} – kolmefaasilised voolutugevused kahefaasilises dq-teljestikus

P – aktiivvõimsus

B_{eq} – ekvivalentne juhtivus

e - hälve referentsväärtusest, võnkesummutite sisendsignaali muutus

c – positiivne kordaja libiseva pinna režiimi juhtahelas

f_{LP} - sagedus päikeseelektriijaama liitumispunktis

$G_{n,est}$ – Smith'i ennustaja ülekandefunktsioon
 K_p, K_P – aktiivvõimsuse baasil töötava võnkesummuti võimenduskordaja
 K_q, K_Q – reaktiivvõimsuse baasil töötava võnkesummuti võimenduskordaja
 K_{SMC} – libiseva pinna režiimi juhtahela võimenduskordaja
 K_{SP} – Smith'i ennustaja juhtahela võimenduskordaja
 K_τ – mudelist sõltuva meetodi lisanduva juhtahela võimenduskordaja
 MVA_{Teq} – trafo ekvivalentne takistus
 T_1, T_{S1} - inertse-diferentseerimislüli ajakonstant lugejas
 T_2, T_{S2} - inertse-diferentseerimislüli ajakonstant nimetajas
 T_f – madalläbipääsfiltri ajakonstant
 T_w – kõrgläbipääsfiltri ajakonstant
 u_{abc} – kolmefaasilised pinged
 u_{dq} – kolmefaasilised pinged kahefaasilises dq-teljestikus
 U_{SMC} – positiivne konstant libiseva pinna režiimi juhtahelas
 u_{SMC} – libiseva pinna režiimi juhtahela väljundsignaal
 x_d – aegviitega signaal
 x_{komp} – mudelist sõltumatul meetodil kompenseeritud signaal
 Z_{eq} – ekvivalentne takistus
 ε – tegur libiseva pinna režiimi juhtahelas
 ζ - sumbuustegur
 λ - omaväärtus
 τ – andmeside aegviite pikkus
 φ - faasinurk
 ω – nurksagedus

SISSEJUHATUS

Teema aktuaalsus

Tänapäeva elektrisüsteemid on muutunud üha keerukamaks, kus aina enam kasutatakse sünkroongeneraatorite asemel muundurpõhiseid tootmisüksusi. Eesti elektrisüsteemiga on 2025. aasta alguse seisuga liitunud 695 MW tuuleparke ja 1210 MW päikeseparke [1]. Elering AS plaanib investeerida Eesti ülekandevõrgu tugevdamisse aastatel 2025-2030, võimaldades võrku ühendatud taastuvenergia mahtu kasvatada ca 5500-6000 MW-ni [2]. Samuti on kasvanud väljakutsed pinge- nurga- ja sagedusstabiilsuse hoidmisel [3]. Teatud olukordades võivad võnkumised võrgus kujuneda nii määravaks, et mida pole enam võimalik Võrgueeskirjas [4] välja toodud piirides summutada. Võimenduvad ja summutamata võnkumised võivad põhjustada elektrikatkestusi ja probleeme kriitilistes elektrivõrgu osades.

Selle magistritöö fookuseks on elektrisüsteemi dünaamilise stabiilsuse, mis näitab suurte häiringute mõju elektrisüsteemile, tagamine päikeseelektrijaama juhtsüsteemidega. Suured häiringud võivad mõjutada süsteemis töötavate tootmiseadmete sumbuvaid ja mitte-sumbuvaid võnkumisi [2]. Töö kestel pööratakse rõhku nurgastabiilsusele, mis näitab generaatorite sünkroonset tööd. Nurga mittestabiilsuse korral hakkab osa generaatoreid pöörlema teiste generaatorite suhtes erineva kiirusega, mis täiendavalt võib tekitada sagedusstabiilsuse kadumise [2]. Äärmiselt olulisel kohal on Eesti elektrisüsteemi toimimisel on oluline hinnata süsteemi võimet jätkata normaaltööd ka pärast süsteemihäiringuid ehk säilitada süsteemistabiilsus [2]. Võrgueeskirjas on kirjeldatud vastavate nõuete täitmine ja süsteemi stabiilsusega seotud aspektide adekvaatne käsitlemine tuleviku elektrisüsteemide raamistikus.

Viimastel aastatel on tekkinud tungiv vajadus uute ja kaasaegsete võnkesummutusmeetodite järele [3]. Lähitulevikus on tekkimas olukord, kus enamik elektritootmisüksustest ei ole enam tavapärased sünkroongeneraatorid vaid tootmisüksused, mille juhtimine on suurel määral sõltuv kasutatavatest juhtimissüsteemidest ja nende seadistustest. Sellest tulenevalt on oluline mõista muundurpõhiste tootmisüksuste juhtimissüsteemide olemust ja nende rakendatavust reaalses elektrivõrgus.

Sünkroonmasinatel põhinevates elektrisüsteemides on üheks oluliseks tingimuseks stabiilsuse tagamise ja selle tarvis on sünkroongeneraatorite pingeregulaatorites rakendatud võnkesummuti funktsioon. Traditsiooniliselt on kasutatud stabiilsuse hoidmiseks elektrisüsteemi võnkesummuteid (PSS), mis toimivad ergastussüsteemina [5]. Sama nõue on Võrgueeskirja kohaselt rakendatud ka muundurpõhiste

tootmisüksustele. Muundurpõhiste üksuste korral nimetatakse seda funktsionaalsust võimsuse võnkumise summutamise funktsiooniks (*Power Oscillation Damping* – POD). Vaadeldav funktsionaalsus on nõudena suhteliselt uus ja paljudes reaalsetes muundurpõhistes elektritootmisüksustes ei ole see veel kasutuses, kuna samalaadse funktsiooni väljatöötamine on ka seadmete tarnijatel alles arendustegevusena planeeritud.

Vaadeldava temaatika kitsaskohad ja väljakutsed on seotud mitmest mõõte- ja juhtmoodulist koosneva vaheldiga võrku ühendatud päikeseelektrijaama andmeedastuse kiiruses ja mahus. Vaadeldaval juhul tekib juht- ja mõõtesüsteemi andmete edastusel ajaline viide ja füüsiline süsteem reageerib hilinemisega. See osutub kitsaskohaks siis, kui võimsuse võnkesummutusfunktsiooni tööd on vaja sünkroniseerida vastavalt võnke avaldumise hetkele. Mitmetes uuringutes on uuritud muundurpõhiste võnkesummutite juhtsüsteemide summutusvõimet, võttes arvesse mitmeid tegureid nagu andmeside aegviiteid, kuid sellega kaasnevate probleemide lahendamine on alles arengujärgus. Samuti on uuritud erinevaid aegviidete kompenseerimismeetodeid, kuid suuresti on need uuringud põhinenud muudel inseneriteaduslikel probleemidel.

Temaatika on olemuslikult aktuaalne nii teaduslikul kui ka praktilisel tasemel ja tulemused on olulised nii muundurpõhiste tootmisüksuste omanikele ja võrguoperaatoritele. Eriti kui võnkesummuti kontseptsioon on mitmete võrguinverterite ja nende juhtsüsteemide tootjate jaoks uudne, ei ole viidetest tekkivatele probleemidele üldse veel rõhku pandud. Sidevõrgu andmeside aegviitest tulenevaid nüansse ei saa aga ignoreerida, kuna võnkesummutite ebakorrektsel rakendumisel võib olukord veel halvemaks kujuneda, kui see oleks ilma selle funktsioonita. Seega lõputöö tulemusena tekib arusaam päikeseelektrijaama juhtimissüsteemide olemusest ja võnkesummutite funktsionaalsuse rakendamisest ning kasutamisest reaalsetes elektrisüsteemides.

Konkreetse magistritöö temaatika on formuleeritud suurema TemTA rahastatud projekti „Elektrisüsteemide optimaalne ja töökindel juhtimine suuremahulise taastuvenergeetika raamistikus“ [6] eeltööna. Uurimisprojekti eesmärgiks on välja töötada tehnilised lahendused, mis tagavad Eesti elektrisüsteemi jätkusuutlikkuse ka pärast Mandri-Euroopaga sünkroniseerimist. TemTA projekti tegevuste raames luuakse elektrisüsteemi digitaalne kaksik, arendatakse välja elektrisüsteemi oleku reaalajas hindamine ja luuakse terviklikud teadmised muundurpõhiste elektrisüsteemide juhtimisest koos võimalikke mõjuteguritega, mis võimaldab tagada suuremahulise taastuvenergia liitumise elektrivõrguga ja suurendada varustuskindlust [6].

Uurimistöö eesmärgid ja ülesanded

Lõputöö eesmärgiks on analüüsida päikeseelektrijaama juhtimissüsteemi talitlust ja välja töötada tehniline lahendus võnkesummutusfunktsiooni rakendamiseks reaalses juhtimissüsteemides. Konkreetse uurimistöö ülesanded on välja toodud järgnevalt.

1. Määratleda missugune päikeseelektrijaamades kasutatav juhtimisloogika meetod oleks kõige mõistlikum kiiresti reageeriva ja stabiilse süsteemi tagamiseks.
2. Analüüsida päikeseelektrijaama juhtimissüsteemi andmeside aegviiteid mõõteandmete lugemisel ja edastamisel ning uurida, mis viisil mõjutavad need süsteemi stabiilsust.
3. Välja töötada võnkesummutusfunktsioon ja analüüsida selle rakendamist reaalses päikeseelektrijaamade juhtimissüsteemides. Samuti analüüsida ja testida erinevaid rakendusi summutuse tagamiseks erinevates olukordades.
4. Uurida mitmeid kompenseerimismeetodeid, mis tagaksid efektiivse võnkesummutuse elektrisüsteemis ka sidevõrgu piirangutest tulenevate andmeside aegviidete korral.
5. Analüüsida ja võrrelda mitmete aegviidete kompenseerimismeetodite efektiivsust, keerukust ja muid nüansse ning anda hinnang nende rakendatavusele.

Uurimistöö tulemusena modelleeritakse terviklik süsteem RSCAD tarkvaras, erinevate stsenaariumite simulatsioonid viiakse läbi elektrisüsteemi reaalarajasimulaatori RTDS abil ning tulemuste analüüsil hinnatakse välja töötatud juhtsüsteemide ja kompenseerimismeetodite efektiivsust.

Hüpoteesid

Magistritöö tulemusena kinnitatakse või lükatakse ümber järgmised hüpoteesid:

1. Sidesüsteemi aegviited halvendavad võnkesummutite talitlust piirini, kus hakkavad iseenda funktsioonile vastu töötama.
2. Elektrisüsteemi häiringujärgne ebastabiilsuse suurus on proportsionaalne andmeside aegviite pikkusega.
3. Andmeside aegviiteid on võimalik kompenseerida iga stsenaariumi korral.
4. Pikemaid juhtsüsteemi aegviiteid on keerulisem kompenseerida kui lühemaid.

5. Süsteemi talitluselt raskemate olukordade häiringujärgset stabiilsust on keerulisem tagada ka siis, kui päikeseelektrijaama juhtsüsteemi aegviide on hästi kompenseeritud.

Lõputöö raporti liigendus

Magistritöö raport koosneb kolmest põhiosa peatükist, mis on omakorda jaotatud jaotisteks ja alajaotisteks. Esimene peatükk annab teoreetilise ülevaate elektrisüsteemi stabiilsusest ja võnkesummutusest, samuti päikeseelektrijaama juhtsüsteemidest ja andmesidest. Peatüki eesmärk on tutvustada lugejale töös kasutatavaid kontseptsioone, mille põhjal on ka üles ehitatud juhtumuuring. Peatükis kirjeldatakse nii laiemalt levinud kontseptsioonide tausta kui ka kirjeldatakse mõnda spetsiifilisemat teemat.

Teises peatükis kirjeldatakse detailselt juhtumuuringu süsteemi ülesehitust, komponente, juhtsüsteeme ja protsesse häiringu korral. Lisaks sellele tehakse lähteandmete põhjal vajalikud arvutused ja selgitatakse välja reaajasimulaatori mudeli ülesehitus. Selles peatükis esitatakse võnkesummutuseta süsteemi tulemused kahe stsenaariumi korral ja analüüsitakse süsteemi stabiilsust pärast häiringut. Vastavalt nendele tulemustele leitakse arvutuslikult ja eksperimentaalselt võnkesummutite parameetrid ning esitatakse simulatsioonide tulemused päikeseelektrijaama andmeside aegviiteta süsteemis.

Kolmandas peatükis tutvustatakse põhjalikult selles töös kasutatavaid aegviidete kompenseerimismeetodeid koos valemite ja illustreerivate skeemidega. Peatüki teises jaotises esitatakse magistritöö kõik uuritavad stsenaariumid aegviitega juhtsüsteemi korral. Peatüki kolmandas jaotises esitatakse simulatsioonide tulemused kompenseerimata võnkesummutitega juhtudel ja kõigi kolme kompenseerimismeetodi kasutamisel. Tulemuste järel dustes antakse kriitiline hinnang meetodite rakendatavusele, efektiivsusele ning üldisele mõistlikkusele reaalsetes olukordades.

1 KIRJANDUSE TEOREETILINE ÜLEVAADE

Käesolev peatükk annab ülevaate elektrisüsteemi stabiilsuse põhialustest, päikeseelektrijaama juhtsüsteemidest ja andmesidest ning tutvustab võnkesummutite funktsionaalsust ja eripärasid.

1.1 Elektrisüsteemi stabiilsus

Käesoleva magistritöö eesmärk on stabiilsuse tagamine muundurpõhiste tootmisüksustega. Staatiline stabiilsus on elektrisüsteemi võime jätkata sünkroonset tööd pärast talitluse väikseid häiringuid [7]. Dünaamiline stabiilsus seevastu on elektrisüsteemi võime taastada lähteseisund pärast suuri häiringuid, milleks on lühised, elektrisüsteemi põhielementide kommutatsioon või järsud koormustõuked [7]. Enamasti on süsteemi stabiilsusele kõige ohtlikumad kolmefaasilised ja vähem ohtlikumad ühefaasilised lühised.

1.1.1 Generaatori diferentsiaalvõrrandid

Dünaamilise stabiilsuse kontrollimiseks on vaja teada generaatori rootori nurga sõltuvust ajas $\delta = f(t)$. Vastavalt Newtoni teisele seadusele on pöörlev rootor matemaatiliselt esitatav valemiga:

$$Jp^2\theta_m = M_m - M_e \quad (1.1)$$

kus J on rootori inertsimoment, θ_m mehaaniline nurk rootori telje ja liikumatu telje vahe ning M_m ja M_e on vastavalt generaatori mehaaniline ja elektriline moment. Inertsikonstant H ehk suhteline inertsimoment (sekundid) on leitav avaldisest:

$$\frac{H}{\omega_0} p^2 \delta = M_m - M_e \quad (1.2)$$

kus ω_0 on elektriline sünkroonkiirus. Inertsikonstandi puhul on tegu ajaga, mis on vajalik selleks, et viia rootori kiirus nullist kuni nimikiiruseni [7].

Võnkumisvõrrand (*swing equation*) koosneb rootori liikumisvõrrandist ja kiiruse hälbega proportsionaalselt summutustegurist K_D [7]:

$$\frac{H}{\omega_0} p^2 \delta = M_m - M_e - K_D \frac{d\delta}{dt} \quad (1.3)$$

1.1.2 Staatilise stabiilsuse matemaatiline kriteerium

Elektrisüsteemi stabiilsust võib matemaatiliselt kirjeldada diferentsiaalvõrrandite abil, näidates siirdeprotsessidele elektrisüsteemis. Stabiilsele või mittestabiilsele olukorrale süsteemis viitab asjaolu, kas pärast väikest häiringust võnkumised sumbuvad või tekib seisundimuutujate piiramatut kasvu. See omakorda jaguneb perioodiliseks või mitteperioodiliseks stabiilsuseks [7].

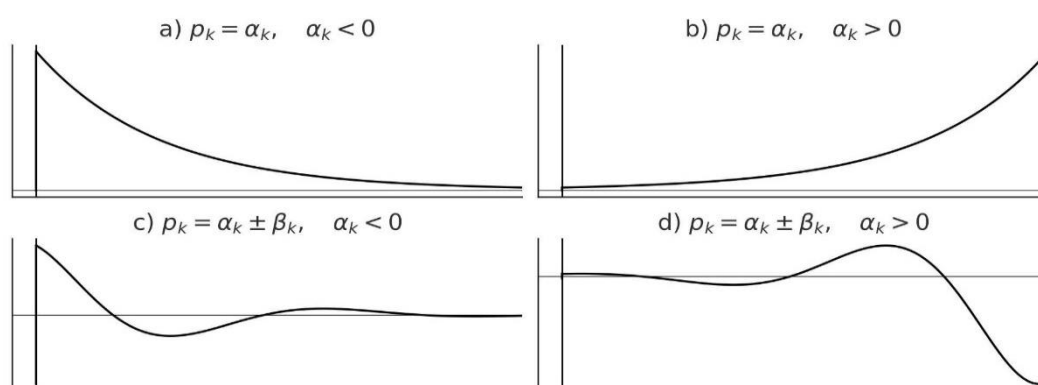
Kuna elektrisüsteemi talitlust kirjeldavad mittelineaarsed võrrandid, siis staatilise stabiilsuse määramised võrrandid lineariseeritakse. Seega elektrisüsteem on stabiilne, kui väikeste häiringute korral lineariseeritud diferentsiaalvõrrandite lahendid on sumbuva iseloomuga [7]. Lineaarse diferentsiaalvõrrandisüsteemi üldlahend avaldub kujul

$$y_i = \sum_{k=1}^n A_{ik} \exp(p_{ik}t) = \sum_{k=1}^n y_{ik} \quad (1.4)$$

kus A_{ik} on algtingimusest tulenevad konstandid ja p_{ik} karaktervõrrandi juured [7]. Karaktervõrrand on võimalik tuletada, kui asendada diferentseerimisel üle t esimest ja teistjärku tuletis polünoomi muutuja p astendajaga. Karaktervõrrandi juurte üldkujuga on järgnevalt [7].

$$p_k = \alpha_k \pm j\beta_k \quad (1.5)$$

Juure tüübi (negatiivne ja positiivne reaalosa, negatiivne ja positiivne kompleksosa) järgi defineeritakse liidetava iseloom diferentsiaalvõrrandi laiendis (joonis 1.1). Reaalosaga juurele $p_k = \alpha_k$ vastab lahendis liidetav $A_{ik} \exp(\alpha_k t)$, mis sumbuu kui $\alpha_k < 0$, või kasvab piiramatult, kui $\alpha_k > 0$. Kompleksosaga juure korral on lahendi liige kujuga $A_{ik} \exp(\alpha_k t) \sin(\beta_k t + \varphi_k)$, mille korral võnkumine sumbuu kui $\alpha_k < 0$ või on piiramatult kasvava amplituudiga kui $\alpha_k > 0$ [7].



Joonis 1.1. Diferentsiaalvõrrandi üldlahendi liidetavate kujud [7]

Elektrisüsteemi stabiilsuse tagamiseks on vajalik, et lineariseeritud diferentsiaalvõrrandite lahendid ja kõik lahendite liidetavad sumbuksid. Selleks selgitatakse välja, kas karaktervõrrandi $D(p) = a_0p^n + a_1p^{n-1} + \dots + a_{n-1}p + a_n = 0$ juured asetsevad komplekstasapinna vasakpoolisel osal, mille kontrollimiseks moodustatakse Routh-Hurwizi maatriks. Elektrisüsteem on aperioidiliselt stabiilne, kui kordaja $a_n > 0$ ja perioodiliselt stabiilne kui miinor $\Delta_{n-1} > 0$ [7].

Staatilise stabiilsuse probleemide eristus

Staatilise stabiilsuse probleemid jaotatakse lokaalseteks ja globaalseteks. Lokaalsed probleemid on seotud üksikute generaatorite või elektri jaamade rootorite võnkumisega süsteemi ülejäänud generaatorite suhtes. Staatilise stabiilsuse globaalprobleemiks on regioonide või alade vaheline võnkumine (*interarea oscillations*) ühend süsteemis, mis avaldub kahes vormis [7]:

- ühe regiooni generaatorite aeglane (0,1...0,3 Hz) võnkumine teise regiooni suhtes
- generaatorite jagunemine mitmeks alarühmaks, mis võnguvad üksteise suhtes sagedusega 0,4...0,7 Hz.

Enamasti turbiinide kiirusregulaatorid süsteemide vahelist võnkumist ei mõjuta [7].

1.1.3 Olekuruum

Dünaamiliste süsteemide stabiilsust uuritakse nende oleku kirjeldamisega, mis esitatakse esimest järku diferentsiaalvõrranditega. Vektorkujul esitakse see:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$$

kus

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

Olekuvektori \mathbf{x} komponendid x_i on olekumuutujad ning vektor \mathbf{u} on süsteemi sisendvektor [7]. Olekuruumi komponente käsitletakse punktina n -mõõtmelises ruumis, mida nimetatakse olekuruumiks (*state space*). Olek annab vähima vajaliku informatsiooni süsteemi kohta mingil ajahetkel t_0 . Olekumuutujate varieerumine viitab olekuruumi koordinaatsüsteemi muutumisele. Süsteemi olek muutub ajas, kui süsteemil puudub tasakaalupunkt või sisend erineb nullist. Tasakaalupunktis on kõik tuletised $\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dots, \dot{x}_n$ nullid ja $\mathbf{f}(\mathbf{x}_0) = \mathbf{0}$, kus on olekuvektori tasakaalupunkt. Tasakaalupunktid iseloomustavad dünaamilisi süsteeme ja on olulised nende stabiilsuse määramisel [7].

Väikeste häiringute korral võib mittelineaarse süsteemi talitlust kirjeldavad võrrandid lineariseerida. Avaldis

$$\Delta x_i(t) = \Phi_{i1} c_1 e^{\lambda_1 t} + \Phi_{i2} c_2 e^{\lambda_2 t} + \dots + \Phi_{in} c_n e^{\lambda_n t} \quad (1.7)$$

kirjeldab olekumuutuja x_i vabaliikumist modaalmaatriksi komponentide Φ_{ij} ja omaväärtuste λ_i kaudu. Skalaarid c_i näitavad olekumuutuja lähteväärtust [7].

Dünaamilise süsteemi vabaliikumise võrrand koosneb n liikmest, mis kirjeldavad erinevaid liikumisviise – moode, mis on antud funktsioonidega $e^{\lambda_i t}$ ja sõltuvad omaväärtustest λ_i . Omaväärtuse reaalkomponent vastab aperiodilisele moodile, mis on sumbuv, kui omaväärtus on negatiivne. Kompleksarvulised omaväärtused $\lambda = \sigma \pm j\omega$ vastavad perioodilisele moodile $e^{\sigma t} \sin(\omega t + \theta)$ sagedusega $f = \omega/2\pi$. Võnkumine sumbub negatiivse σ korral ajakonstandiga $1/|\sigma|$. Sellist lähenemist nimetatakse modaalanalüüsiks [7].

Dünaamilise süsteemi staatiline stabiilsus on määratud lineariseeritud olekuvõrrandite karaktervõrrandite juurtega maatriksi (olekumaatriksi)

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

omaväärtusetega. Kui omaväärtuste reaalosad on kõik negatiivsed, siis on süsteem asümptootiliselt stabiilne. Kui vähemalt ühe omaväärtuse reaalosa on positiivne, siis on süsteem ebastabiilne ning kui mõne omaväärtuse reaalosa on null, siis pole olukord selge [7].

Klassikaline mudel

Generaatori klassikaline mudel koos summutusmomendi tegur K_D ja sünkroniseeriva momendi teguriga K_S on esitatav olekumaatriksi kujul [7]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_D}{H} & -\frac{K_S}{H} \\ \omega_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta M_m \quad (1.9)$$

Lisaks süsteemi omasagedus on $\omega_n = \sqrt{K_S \frac{\omega_0}{H}}$ ja sumbuvustegur on arvutatav valemiga:

$$\zeta = \frac{1}{2} \frac{K_D}{\sqrt{K_S H \omega_0}}$$

Sünkroniseeriva momendi teguri K_S kasvades süsteemi omasagedus tõuseb ja sumbuvustegur kahaneb. Inertsikonstandi suurenemine vähendab süsteemi omasagedust ja sumbumistegurit [7].

1.1.4 Dünaamiline stabiilsus

Elektrisüsteemi dünaamiline stabiilsus on süsteemi võime säilitada sünkronism pärast suuri häiringuid [7]. Suurte häiringute tagajärjel muutuvad generaatorite rootorite nurgad, võimsusvood, sõlmepinged ja talitluse teised parameetrid. Generaatorite dünaamilist stabiilsust mõjutavad enamasti järgnevad tegurid: generaatori võimsus enne häiringut; generaatori võimsus häiringu ajal, mis sõltub lühise tüübist ja asukohast; lühise kestvus, elektrisüsteemi reaktiivtakistus; generaatori inertsimoment ning generaatori elektromotoorjõud enne häiringut [7].

Dünaamilise stabiilsuse hindamisel analüüsitakse generaatorite ja teiste elektrisüsteemi dünaamiliste elementide talitusparameetrite ajalisi muutusi [7]. Need esitatakse esimest järku mittelineaarsete diferentsiaalvõrranditega:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t) \quad (1.10)$$

kus x on n komponendiga olekuvektor ja t on aeg. Võrrandi lahendamisel on olulised olekuvektori lähteväärtus x_0 ajamomendilt t_0 . Võrrandid lahendatakse numbriliste arvutusmeetodite abil, kasutades võimalikult väikseid ajasamme [7].

1.2 Päikeseelektrijaama juhtsüsteemid

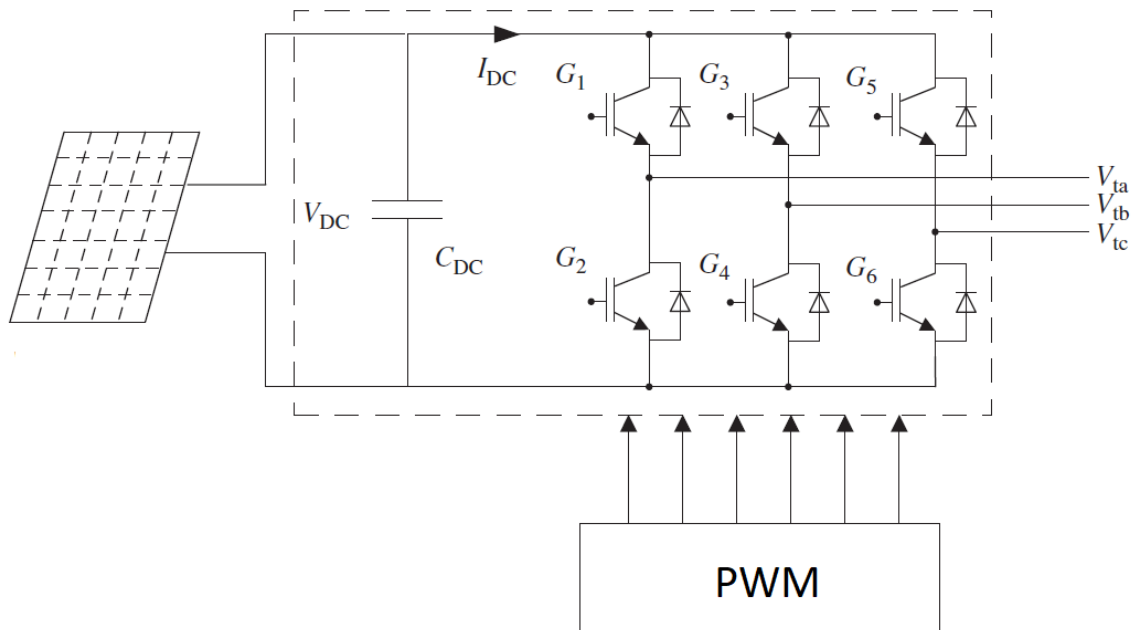
1.2.1 Pingelähtega vaheldi

Klassikaline päikeseelektrijaama vaheldi ehk võrguinverter on pingelähtega muundur (VSI – *Voltage Source Inverter*), mis muundab päikesekiirguse toodetud alalisvoolu vahelduvvooluks [8]. Lihtne ja laialdaselt kasutatav vaheldi topoloogia on kahe-tasandiline kuue impulsiga (G_1, G_2, \dots, G_6) VSI, mille alalisvoolu poolel on kondensaator (joonis 1.2). Igal harul on kaks paralleelset vastassuunaga diodidega isoleeritud paisuga bipolaartransistorit (*Insulated Gate Bipolar Transistor* – IGBT), mis impulsslülitustega genereerib vahelduvvoolu, kasutades selleks alalisvoolu kondensaatori C_{DC} sisendpinget V_{DC} . Impulsid genereerib impulsslaiusmodulatsiooni (PWM) seade [8].

VSI alalisvoolutoide tagatakse päevasel ajal päikesepaneelidega. Kahe-tasandilise VSI alalispinge V_{DC} määratakse järgmise valemi põhjal

$$V_{DC} \geq 2 \sqrt{\frac{2}{3}} V_{LL} \quad (1.11)$$

kus V_{LL} on liinipinge inverteri vahelduvvooluklemmil [8].



Joonis 1.2. Kahetasandiline pingelähtega võrguinverter (VSI) [8]

1.2.2 Vaheldi matemaatiline esitus

abc-dq transformatsioon

Võrguinverterite juhtsüsteemide modelleerimiseks kasutatakse $abc \rightarrow dq$ raamistiku matemaatilist teisendust eesmärgiga muuta keeruline kolmefaasiline vahelduvvoolusüsteem (mis on ajas muutuv ja siinuslaineline) lihtsamaks ja esitada see statsionaarseks kahefaasilises pöörlevas koordinaadistiku raamistikus. Selliselt lahendatakse probleem alalisvoolu signaalidena, mis võimaldab süsteemi dünaamikat lihtsamalt kirjeldada ja juhtimisülesandeid täita „lahti seotud“ (*decoupled*) viisil [8].

Üldises esituses kirjeldatakse tasakaalustatud kolmefaasilist siinusfunktsiooni selle üksikute faaside kaudu abc raamistikus järgnevalt:

$$\begin{aligned}
 u_a(t) &= \hat{u} \cos(\omega t + \theta_0) \\
 u_b(t) &= \hat{u} \cos\left(\omega t + \theta_0 - \frac{2\pi}{3}\right) \\
 u_c(t) &= \hat{u} \cos\left(\omega t + \theta_0 - \frac{4\pi}{3}\right)
 \end{aligned} \tag{1.12}$$

kus \hat{u} on amplituud, ω nurksagedus ja θ_0 funktsiooni algfaasi nurk. Sellele siinusfunktsioonile vastav ruumivektor on määratletud kui:

$$\vec{u}(t) = \frac{2}{3} \left[u_a(t)e^{j0} + u_b(t)e^{j\frac{2\pi}{3}} + u_c(t)e^{j\frac{4\pi}{3}} \right] = (\hat{u}e^{j\theta_0})e^{j\omega t} \tag{1.13}$$

Otsene teisendus abc-raamistikust dq-teljestikku saadakse järgnevalt:

$$\begin{bmatrix} u_d(t) \\ u_q(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \varphi(t) & \cos \left[\varphi(t) - \frac{2\pi}{3} \right] & \cos \left[\varphi(t) - \frac{4\pi}{3} \right] \\ \sin \varphi(t) & \sin \left[\varphi(t) - \frac{2\pi}{3} \right] & \sin \left[\varphi(t) - \frac{4\pi}{3} \right] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a(t) \\ u_b(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

kus $\varphi(t)$ on ajas muutuv faasinurk [8]. Tasakaalustatud kolmefaasilise võrgu iga ajahetke pinged ja voolud tähistatakse vastavalt $v_{abc}(t)$ ja $i_{abc}(t)$. Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse ($P(t)$ ja $Q(t)$) hetkväärtused on võimalik arvutada dq-teljestikku komponentide kaudu:

$$\begin{aligned} P(t) &= \frac{3}{2} [v_d(t)i_d(t) + v_q(t)i_q(t)] \\ Q(t) &= \frac{3}{2} [-v_d(t)i_q(t) + v_q(t)i_d(t)] \end{aligned} \quad (1.15)$$

kus $v_d(t)$ ja $v_q(t)$ on pinge väärtused dq-teljestikus [8].

Impulsslaiusmodulatsioon (PWM)

Juhitavate võrguinverterite siinuslaine moduleerimiseks kasutatakse impulsslaiusmodulatsiooni meetodit (*Pulse Width Modulation* - PWM) [8]. Selle puhul rakendatakse lülitusimpulsse, kus iga impulsi laius on erinev. Kõige sagedamini kasutatav PWM meetod on SPWM-meetod, mille puhul impulsid genereeritakse perioodilise kõrgsageduslikku kolmnurgakujulise kandesageduslaine signaali ja moduleeriva siinussignaali abil. Moduleeriv signaal tähistab vaheldi väljundis soovitud siinuspinget. Lülitusimpulsid genereeritakse kolmnurklaine pinge ja moduleeriva siinussignaali ristumiskohas. Kandva kolmnurklaine sageduse valik põhineb kompromissil genereeritud harmoonikute ja lülituskadude vahel. Kõrgem sagedus vähendab harmoonilisi komponente ja tagab puhtama siinuspinge, kuid tekitab muunduris suuremaid lülituskadusid. Tüüpilised lülitussagedused on valitud vahemikus 2 kuni 15 kHz [8].

Sõltuvus kahetasandilise sillaga inverteri vahelduvvoolu klemmi pingete V_{abc} põhikomponentide ja selle alalisvoolu klemmi pinge V_{DC} vahel esitatakse järgmiselt:

$$\begin{aligned} V_a(t) &= \frac{V_{DC}}{2} m_a(t) \\ V_b(t) &= \frac{V_{DC}}{2} m_b(t) \\ V_c(t) &= \frac{V_{DC}}{2} m_c(t) \end{aligned} \quad (1.16)$$

kus m_a , m_b ja m_c on modulatsiooniindeksid abc-raamistikus ($m_{abc} \leq 1$) [8].

1.2.3 Päikeseelektrijaama juhtsüsteemi komponendid

Elektrijaama juhtseade (PPC)

Suuremate päikeseelektrijaamade puhul kasutatakse nii keskset juhtsüsteemi kui võrguinverteri-taseme juhtseadmeid [8]. Tsentraalseks reguleerimiseks kasutatakse digitaalsetel tehnoloogiatel põhinevat juhtseadet või juhtkontrollerit PPC, mis tuleneb inglisekeelsest nimetusest *Power Plant Controller*. Kui inverterite enda juhtsüsteemid on loodud teostama kohalikku juhtimist, siis PPC on kõrgetaseme juhtseade, mille eesmärk on vastu võtta kasutaja poolt antud juhttoiminguid jagada vastavad sätteväärtused võrguinverterite vahel [9].

Elektrijaama juhtkontrolleri kiire ja usaldusväärse juhtsüsteemi tagamiseks kasutatakse juhtloogikat elektrijaama tsentraalsel tasandil ja suletud ahelaga juhtimisskeeme koos käskudega, mis saadetakse võrguinverteritele. Tavaliselt koosneb elektrijaama juhtseade ühest kontrollerist, mis juhhib ühe kõrgepingelati väljundit, mida nimetatakse POI-ks (*Point of Interconnection*). Käsud edastatakse juhtseadmele, SCADA süsteemi või muu liideseadme, näiteks alajaama RTU kaudu [10].

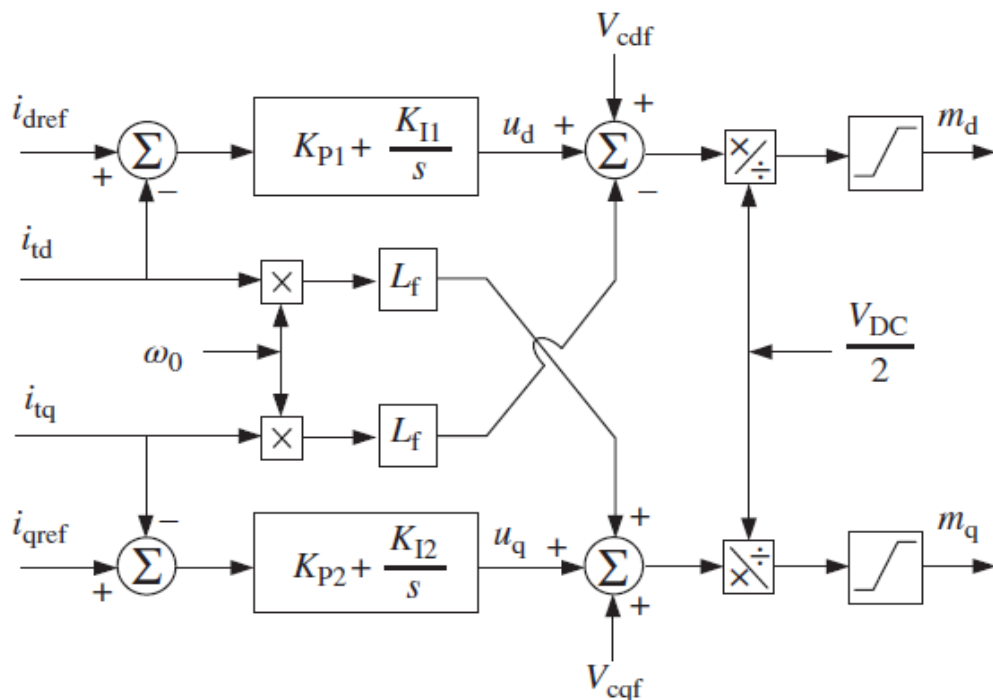
Päikeseelektrijaamade juhtkontrollerid on kujundatud vastavalt elektrivõrgu tehnilistele nõuetele ning peab suutma võrgule pakkuda pinge ja sageduse reguleerimise tuge, võimsuseteguri, aktiivvõimsuse ja reaktiivvõimsuse juhtimise võimekust [9]. Samuti peab juhtkontroller olema võimeline väljundeid sujuvalt reguleerima vastavalt etteantud parameetritele ning häiringute korral elektrivõrku toetama [9].

Vaheldi vooluregulaator

Päikeseelektrijaama pingelähtega inverteri (VSI) sees kasutatakse aktiiv- ja reaktiivvõimsuse juhtimiseks vooluregulaatorit, s.t. aktiiv- ja reaktiivvõimsuse väljundit juhitakse vaheldi vooluväljundi põhiselt [8]. Joonis 1.3 illustreerib vaheldi vooluregulaatori juhtahelat, kus d-telje voolukomponenti i_{td} ja q-telje voolukomponenti i_{tq} reguleeritakse vastavalt nende referentsväärtustele i_{dref} ja i_{qref} . Soovitud aktiiv- ja reaktiivvõimsuse saavutamiseks, leitakse voolureferentsväärtused vastavalt aktiivvõimsuse P_{ref} ja reaktiivvõimsuse Q_{ref} referentsväärtusele järgnevalt:

$$\begin{aligned}i_{dref} &= \frac{2}{3V_d} P_{ref} \\i_{qref} &= \frac{2}{3V_q} Q_{ref}\end{aligned}\tag{ 1.17 }$$

kus V_d ja V_q on vastavalt võrgupinge d- ja q-ahela komponendid [8].



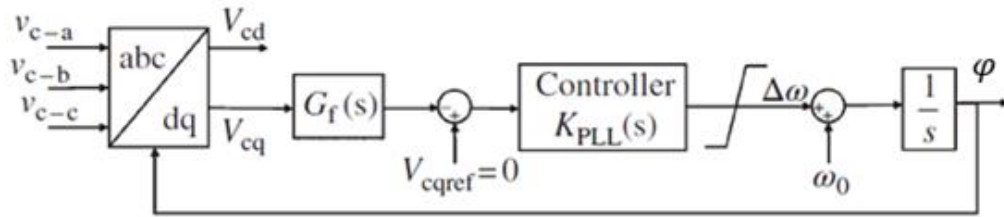
Joonis 1.3. Vooluregulaatori plokk skeem [8].

L_f kujutab vahelduvvoolufiltri induktiivosa. Modulatsiooniindeksi d- ja q-ahela komponendid on m_d ja m_q , mis teisendatakse võrgupinge ja alalisvoolupinge V_{DC} suhtest. Hälbet $i_{dref} - i_{td}$ ja $i_{qref} - i_{tq}$ on sisenditeks PI-regulaatoritele K_d ja K_q , mille väljunditeks on nüüd pingesignaalid u_d ja u_q . PI-regulaatori proportsionaalse osa kordajad on K_{P1} ja K_{P2} ning integraali kordajad on K_{I1} ja K_{I2} [8].

Faasilukustusahel (PLL)

Vaheldi on vahelduvvoolusüsteemiga ühendatud tavaliselt läbi elektrivõrku ühendatud lati, mille pinge muutub pidevalt koos sagedusega. Nii võrgu püsiseisundis kui rikete esinemisel võib tekkida asümmeetria erinevates faasides ja moonutused harmoonikute tõttu. On äärmiselt oluline, et vaheldi oleks võrku ühendatud igasugustel tingimustel ja sünkroniseeritud vahelduvvoolusüsteemi põhisageduse positiivse järgnevuse pingekomponendi sageduse ja faasiga. Selle tagamiseks kasutatakse faasilukustusahelat ehk faasilukku (*Phase-Locked Loop* – PLL), mis tuvastab kiiresti ja täpselt muutused võrgupinge sageduses ja faasides ning arvutab võrgupinge faasori faasinurga. Enamik vaheldi juhtimissüsteeme põhinevad sünkroonselt pöörleval d-q teljestikul, kus faasilukk seob lahti latipinge d-telje ja q-telje komponendi [8].

Selleks, et eraldada aktiiv- ja reaktiivvõimsuse juhtahelad, tuleb pingevektori q-telje komponent muuta nulliks. See tähendab, et $\varphi(t)$ väärtust reguleeritakse vastavalt seaduspärasusele $(\omega t + \theta_0)$ (joonis 1.4) [8].



Joonis 1.4. Faasilukustusahela plokskeem [8]

Esmalt läbib pingesignaal madalpääsfiltri $G_f(s)$, et kõrvaldada kõik moonutused ja harmoonilised komponendid. Teisena leitakse hälve filtreeritud pingekomponenti referentssignaali vahel, mille väärtuseks on null. Veasignaali on sisendiks faasilukustusahela PI-regulaatorisse $K_{PLL}(s)$, mis teisendab selle sageduse muudu signaaliks $\Delta\omega(s)$, mis on tegeliku sageduse kõrvalekalle süsteemi nimisagedusest ω_0 . Signaal on sisendiks blokile $\frac{1}{s}$, mis suurendab või vähendab dq-teljestiku pöörlemiskiirust vastavalt võrgu nimisagedusele ω_0 ja teisendab nurkkiiruse pingevektori nurgaks φ [8].

Võib tunduda, et faasilukk mängib rolli ainult inverteri pingesünkroniseerimises võrgupingega erinevates võrgu operatiivtingimustes, kuid seda põhifunktsiooni täidab vaheldi juhtsüsteem, vahendades võrguga aktiiv- ja reaktiivvõimsusvoogusid. Faasilukustusahela dünaamika võib aga mõjutada elektrisüsteemi stabiilsust, eriti nõrkade võrkude korral. Seetõttu tuleb faasiluku juhtseadme parameetrid määrata hoolikalt [8].

Võimsuse maksimumpunkti jälgimisseade (MPPT)

Päikesepaneelide toodetud võimsus on päikesepaneeli pinges mittelineaarne funktsioon, mis tähendab, et konkreetse päikese kiirgustiheduse ja temperatuuri korral toodab päikesepaneel teatud pinges väärtuse juures maksimaalset alalisvoolu. Seda tööpunkti nimetatakse maksimaalseks võimsuspunktiks (MPP), mille jälgimiseks kasutatakse alalisvoolu kontrolleri, mis reguleerib päikesepaneeli pinget eesmärgiga leida maksimaalse võimsusega tööpunkt. Kuigi see pinges on konkreetselt määratletud ühe päikesepaneeli jaoks, kehtib see ka mitme järjestikuse ja paralleelse paneeliga päikesepaneelide puhul, juhul kui kõik paneelid alluvad samadele tingimustele (päikese kiirgusele ja temperatuurile). Võimsuse maksimumpunkti jälgimisseadme (*Maximum Power Point Tracking* - MPPT) algoritm määrab MPP pinges ja suunab selle viitena pingekontrollerile, mis omakorda reguleerib alalisvoolu kondensaatori pinget konkreetsel pingetasemel [8].

1.2.4 Sätteväärtusepõhine juhtimine

Aktiivvõimsuse juhtimine

Peamine printsiip, mis võimaldab sünkroonsetel pöörlevatel masinatel reguleerida oma väljundvõimsust, on sõltuv sageduse varieeruvusest masina klemmidel. Kui võrgu kaks punkti töötavad erinevatel sagedustel, suureneb aktiivvõimsuse edastamine kõrgema sagedusega asukohast madalama sagedusega asukohta. Protsess toimub kuni saavutatakse püsiseisund. Seda sünkroongeneraatorite aktiivvõimsuse ja sageduse vahelist füüsilist seost tuleb ka vaheldite juhtimisel rakendada, kui süsteem sisaldab inverteripõhiseid elektriallikaid [11].

Pinge reguleerimine

Pinge juhtimine peab tagama, et allikate vahel ei oleks suuri ringlevaid reaktiivvõimsuse voogusid. Ilma pinge juhtimiseta võivad tekkida pinge- ja reaktiivvõimsuse võnkumised. Selline olukord nõuab reaktiivvõimsuse juhtimist, mis suudaks pinge väärtus stabiilsena hoida. See tähendab, et kui vooluallika genereeritud reaktiivvõimsus muudab võimsusvoo läbi konkreetse punkti mahtuvuslikumaks, vähendatakse pinge sätteväärtust, ja vastupidi, kui voog muutub induktiivsemaks, peab aga pinge sätteväärtust suurendama vastavalt pinge-reaktiivvõimsuse kõverale. [11].

1.2.5 Sagedustundliku juhtimise rakendamine võrguinverterites

Elektrivõrgus iseloomustab pinge ja sageduse mõju aktiiv- ja reaktiivvõimsusele pinge- ja sagedustundlikkus [7]. Sünkroongeneraatorite puhul sageduse ja pöörlemiskiiruse muutumisele reageerivad turbiinide kiirusregulaatorid, mis muudavad auru või vee juurdevoolu ja seega ka turbiini ja generaatori võimsust. Kiirusregulaatorid seadistatakse tööle kindla statismiga, s.t. sageduse-võimsuse karakteristiku järgi [7].

Sünkroonsetele masinatele rakendatud sagedusjuhtimissüsteemi analoogia seisneb süsteemi sageduse mõõtmises ja tegeliku võimsuse juhtimises. Reaktiivvõimsuse juhtimine toimub üldiselt U-Q graafiku alused. Kolmefaasilised klemmipinged U_a, U_b, U_c mõõdetakse ja suunatakse sisendväärtustena juhtkontrollerisse. Arvutatakse välja klemmi pingevektori suurus ja võrreldakse seatud kontrollväärtusega. Pinge reguleerimise juhtploki väljund annab reaktiivvõimsuse, mis tuleb juhtkontrollerisse sisestada klemmipinge hoidmiseks vastavalt statismi väärtusele [11].

Statismi järgi juhtimist või *droop*-juhtimiseks nimetatakse sageduse primaarreguleerimiseks [7]. Primaarreguleerimisel reageerivad sageduse hälbele Δf kiirusregulaatorid, muutes võimsust ΔP :

$$\Delta P = -K(f - f_0) = -K\Delta f \quad (1.18)$$

kus tegur K on sagedustundlikkus (ühik – MW/Hz) ja f_0 on sageduse sättesuurus, mis üldiselt on nimisagedus f_n , milleks on Eestis 50 Hz [7]. Suhtelistes ühikutes on see

$$\Delta P = -\frac{1}{\sigma} \frac{\Delta f}{f_n} P_n \quad (1.19)$$

kus $\sigma = 1/K$ on süsteemi statism [7].

Vaheldites analoogselt mõõdetakse süsteemi sagedust mõõdetakse faasilukustusahela (PLL) seadmega, mis töötab kolmefaasilisel pingel. Mõõdetud süsteemi sagedust võrreldakse kontrollväärtusega. Sagedushälve filtreeritakse madalpääsfiltri abil ja korrutatakse sagedusjuhtimise eesmärgil võimendusteguriga [10]. Aktiivvõimsus määrab sageduse ja reaktiivvõimsus määrab pinge magnituudi vastavate statismide kaudu. Faasinihke korrigeerimine tagatakse proportsionaalselt vastavalt mõõdetud aktiivvõimsusele [10].

1.3 Võnkumiste summutamine elektrisüsteemis

1.3.1 Võnkesummutite klassifikatsioon

Teaduskirjanduses eristatakse mitmesuguseid juhtsüsteeme madalasageduslike võnkumiste summutamiseks. Sünkroomasinat korral on kasutusel võnkesummuti (PSS) ning muundurpõhiste tehnoloogiate korral kasutatakse elektri ja reaktiivvõimsusel või mõlemal suurusel põhinevad võnkesummuteid (POD-P, POD-Q ja POD-PQ) [5].

Klassikaline elektrisüsteemi võnkesummuti (PSS)

PSS (*Power System Stabilizer*) funktsionaalsus põhineb summutusfunktsiooni lisamisega generaatori rootorile, kus stabiliseerimine toimub läbi ergutussignaali. Võnkesummuti tekitab elektrilise pöördemomendi, mis on samas faasis rootori kiiruse hälbega [5]. Elektrisüsteemi võnkesummuti funktsionaalsus tagatakse läbi tagasiside elemendi, mis sisaldab rootori võlli pöörlemiskiirust. Selleks, et vältida ebasoovitavaid sageduskomponente, lisatakse PSS süsteemi filter ning erguti küllastumise vältimiseks limiteeritakse PSS sisendsignaali vastavalt realistlikele piiridele [12].

Muundurpõhine võnkesummuti (POD controller)

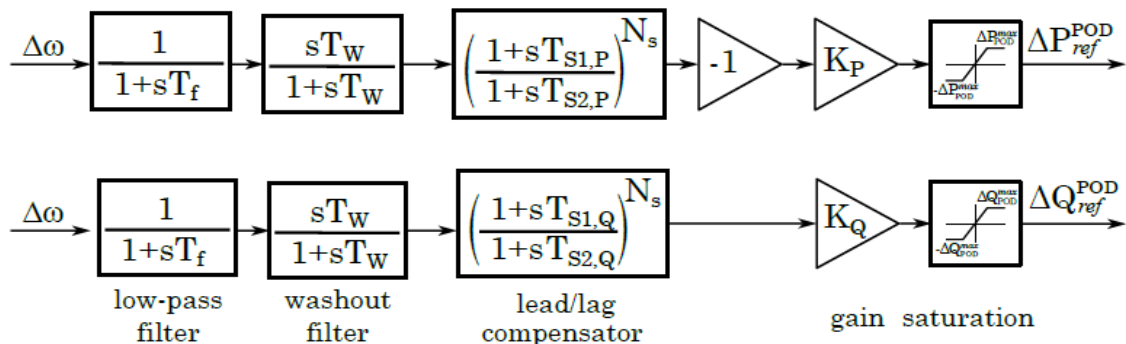
Võnkesummuti (POD - *Power Oscillation Damping*) juhtkontrolleri eesmärk ja funktsioon sarnaneb olemuslikult PSS-ile. Taastuvelektri jaama POD-juhtkontroller asetatakse

elektrijaama juhtkontrollerisse (PPC), mis suunab summutussignaalid edasi inverterite juhtsüsteemidesse. Selle funktsiooni puhul eritatakse kahte laadi juhtahelat: võnkesummuti-P signaal aktiivvõimsuse ja võnkesummuti-Q reaktiivvõimsuse juhtimiseks [5].

1.3.2 Muunduripõhiste võnkesummutite (POD) ülesehitus

Võnkesummutussüsteemid sarnanevad ülesehituselt PSS-ile ja jagatakse kaheks võnkesummuti-P (POD-P) ja võnkesummuti (POD-Q) juhtahelaks, mis omakorda koosnevad mitmest blokist, milleks on filtrid, piirväärtused ja regulaatorid (joonis 1.5):

- Madalpääsfilter (*low pass filter*) – filtreerib signaalist kõrgsagedusliku müra, määratakse ajakonstant T_f [13].
- Signaali filter (*signal washout filter*) – kõrgläbipääsfilter (*high-pass filter*) – filter, mis peab sisendsignaalist kinni püsiseisundile viitavad sagedused ja lubab läbida sagedustel, mis kirjeldavad signaali kiireid muutuseid. Ajakonstant T_w on enamasti vahemikus 1 kuni 20 sekundit [14].
- Inertne-diferentseerimislüli (*phase lead/ lag compensation filter*) – faasinihet kompenseeriv filter, mille eesmärk on luua elektromagnetiline komponent, mis nihutab signaali õigesse faasi, et võnkumine summutada [14]. Leitakse ajakonstandid $T_{S1,P}$, $T_{S2,P}$, $T_{S1,Q}$, $T_{S2,Q}$ ja astendaja N_s määrab filtrite arvu [13].
- Võimendustegur (*stabilizer gain*) K_P , K_Q – kõrgem kordaja võimendab summutussignaali efekti, mis valitakse vastavalt maksimaalsele summutusvõimekusele (kriitilises süsteemi moodis), mis samal ajal ei võimendaks signaali müra ega ei rikuks teiste süsteemi komponentide stabiilsust [14].
- Võnkesummuti piirid või limiidid ($\Delta P_{POD}^{min}, \Delta P_{POD}^{max}$, $\Delta Q_{POD}^{min}, \Delta Q_{POD}^{max}$) – määratakse suhtena nimivõimsusest [15].



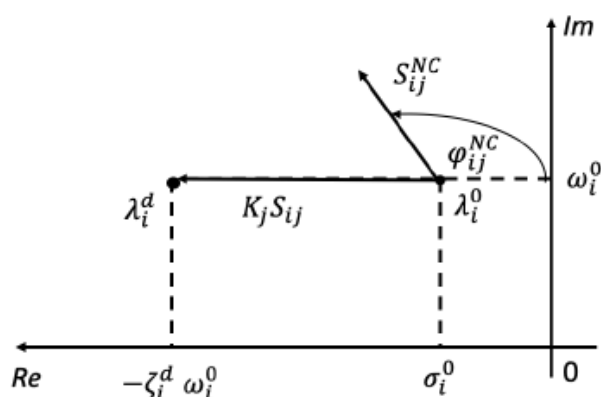
Joonis 1.5. Võnkesummuti-P (POD-P) ja võnkesummuti-Q (POD-Q) ülesehitus ja parameetrid [13]

Sisendsignaali on mõõdetud sageduse ω hälve võrgusagedusest ω_0 , matemaatilisel kujul $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ [13]. Võnkesummuti-P kontrolleri juhtahelasse lisatakse "-1", kuna sama sisendsignaali korral peaksid võnkesummuti-P kontrolleri ja võnkesummuti-Q kontrolleri signaalid olema vastupidise suunaga [15].

1.3.3 Võnkesummutite disain võrguinverterite jaoks

Võnkesummutite kontrollid koos konkreetsete parameetritega disainitakse tuginedes modaalanalüüsile. Selle abil leitakse süsteemi kriitiline elektromehaaniline mood i ja selle omaväärtus $\lambda_i^0 = \sigma_i^0 \pm j\omega_i^0$ [13]. Võnkesummuti kontrolleri j kasutatakse kriitilise elektromehaanilise moodi i summutamiseks. Kriitilise elektromehaanilise moodi esialgne sumbuvustegur on ζ_i^0 ja POD kontrolleri jaoks vajalik summutussuhte sumbuvustegur ζ_i^d . Tõhus POD kontrolleri nihutab kriitilise elektromehaanilise moodi i komplekstasandi vasakusse serva nagu näitab joonis 1.6 [13], s.t. muudab süsteemi stabiilseks. Sellele vastab omaväärtus:

$$\lambda_i^d = -\zeta_i^d \sigma_i^0 \pm j\omega_i^0 \quad (1.20)$$



Joonis 1.6. Omaväärtuse tundlikkuse geomeetriline tõlgendus koos võnkesummuti j mõjuga [13]

Kriitilise elektromehaanilise moodi i tundlikkus muutuste suhtes võnkesummuti juhtahela j võimendusteguriga K_j on leitav valemist $S_{ij} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial K_j}$ [13]. Kriitilise elektromehaanilise režiimi i kompenseerimata (NC) tundlikkus kompenseerimata POD-kontrolleri j võimendusteguri suhtes leitakse järgnevalt:

$$S_{ij}^{NC} = \left. \frac{\partial \lambda_i}{\partial K_j} \right|_{T_{1,j}=T_{2,j}=0} = |S_{ij}^{NC}| \angle \varphi_{ij}^{NC} \quad (1.21)$$

kus φ_{ij}^{NC} on kompenseerimata elektromehaanilise moodi faasinurk (vahemikus $-180^\circ \dots 180^\circ$) [13]. Seega suhtarvuga $a_j = T_{2,j}/T_{1,j}$ vajaliku kompensatsiooni mastaap selgitatakse välja järgmise seaduspärasusega:

$$\begin{aligned} \text{Kui } \varphi_{ij}^{NC} \geq 0, \text{ siis } a_j &= \frac{1 - \sin \Phi_{ij}}{1 + \sin \Phi_{ij}} \leq 1, \Phi_{ij} = \frac{\pi - \varphi_{ij}^{NC}}{N_{S,j}} \\ \text{Kui } \varphi_{ij}^{NC} < 0, \text{ siis } a_j &= \frac{1 + \sin \Phi_{ij}}{1 - \sin \Phi_{ij}} > 1, \Phi_{ij} = \frac{\pi + \varphi_{ij}^{NC}}{N_{S,j}} \end{aligned} \quad (1.22)$$

Faasi kompenseeriva filtrite ajakonstandid $T_{1,j}$ ja $T_{2,j}$ leitakse lisades filtri sagedusele, mis asub kriitilise elektromehaanilise moodi i keskel [13]. Seega

$$T_{1,j} = \frac{1}{\omega_i^0 \sqrt{a_j}}, T_{2,j} = a_j T_{1,j}. \quad (1.23)$$

Teoreetiliselt on võimalik määrata ka kompenseerimiseks vajalik võimendustegur, rakendades valemit [13]

$$K_j = \frac{|\lambda_i^d - \lambda_i^0|}{\left| \frac{\partial \lambda_i}{\partial K_j} \right|} \quad (1.24)$$

ja lahendada see numbrilisel meetodil.

1.4 Päikeseelektrijaama andmeside

Käesoleva töö päikeseelektrijaama juhtsüsteemi andmeside on üles ehitatud mitmetest komponentidest. Selleks on Modbus protokollil põhinev side elektrijaamatasandi juhtkontrolleri PPC ja võrguinverterite vahel, mille kaudu saadetakse seadepunktid inverteritesse ning andmelogija (*datalogger*), mille eesmärgiks on mõõta ja edastada mitmesuguseid elektrilisi parameetreid. Võrguinverterite sisemised juhtahelad ei kuulu selle lõputöö mahtu.

1.4.1 Side liitumispunkti ja inverterite vahel

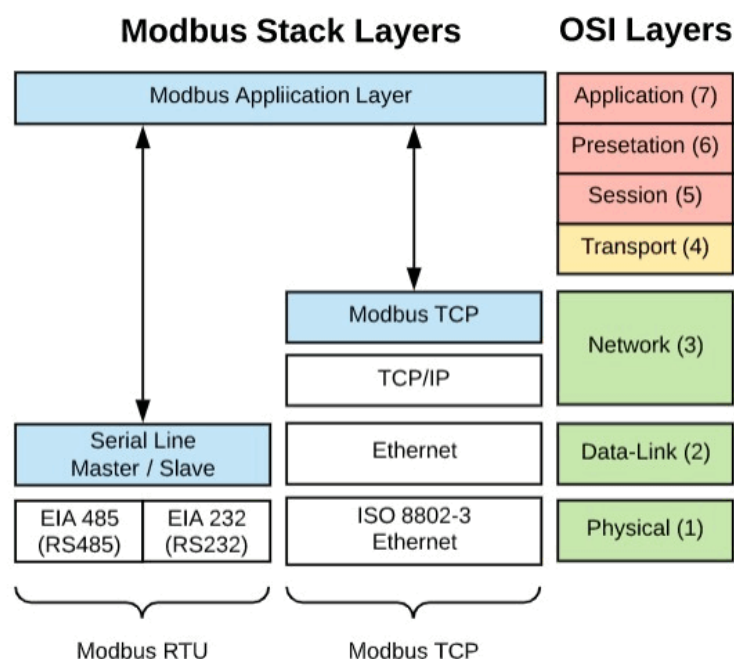
Andmeside elektrijaama keske juhtkontrolleri (PPC) ja inverterite vahel ehitatakse enamasti üles Modbus TCP või RTU protokollil. Modbus on sõnumsideprotokoll, mis asub avatud süsteemide vastastikuse ühenduse (*Open Systems Interconnection* - OSI) mudeli seitsmendal tasemel, mis võimaldab kliendi/serveri kommunikeerida erinevate sidekanalite või võrkudega ühendatud seadmete vahel [16]. Andmeside selle protokolliga kaudu toimub baseerudes „Master“/ „Slave“ suhtlusele – üks seade peab päringu algatama ja seejärel vastust ootama, kusjuures „Master“ vastutab iga suhtluse algatamise eest. Päringute ja vastuste sisu on määratletud erinevate protokolliga kihtidega

ning Modbusi sõnum koosneb protokolliga PDU-kihist (*Protocol Data Unit*), mis on teistest sidekihtidest sõltumatu [16].

Modbus RTU ja TCP

Modbusi kaudu kogutud andmed salvestatakse kas diskreetsetesse sisenditesse, hoiuregistritesse või sisendregistritesse [16]. Nende mäluplokkidega on määratletud ka andmetüübid ja „master“ ja „slave“ juurdepääsud andmetele. „Slave“-seadmel on otsene juurdepääs andmetele, mis on seadmetesse lokaalselt salvestatud, aga „master“ juurdepääsu „slave“-seadme andmetele küsima funktsioonikoodide kaudu. Selleks saab kasutada seerialil põhinevat või TCP / IP võrguprotokolliga [16].

Modbus RTU (*Remote Terminal Unit*) saavutatakse Modbus jadaühenduse RS-485 kaudu, samas kui Modbus TCP on Modbus Etherneti ühenduse kaudu. Inverteri- ja PV-monitoorimis-rakendust tootjad pakuvad palju andmekogumisseadmeid (*data-loggereid*), millel on RS-485 Modbus RTU ja Etherneti Modbusi TCP-pordid [17]. Modbus protokollide andmekihtide kasutust kirjeldab joonis 1.7.



Joonis 1.7. Erinevused Modbus RTU ja TCP vahel vastavalt OSI mudelile [18]

Modbus TCP puhul on Modbusi andmed kapseldatud TCP/IP paketti ja kasutavad alamseadmetega suhtlemiseks IP-adresse. See võimaldab Modbus TCP-seadmel hõlpsasti ühendada ja suhelda olemasolevate Etherneti ja fiiberoptiliste võrkude kaudu. Seetõttu peaks iga TCP/IP-d toetav Etherneti võrk otseselt toetama Modbus TCP-d. Samuti võimaldab Modbus TCP kasutada palju rohkem adresse kui Modbus RTU RS-485, sealhulgas mitu ülemseadet ja kiirust gigabitises vahemikus. Kui Modbus RTU-

on võrgu kohta 247 sõlme piirang, siis Modbusi TCP-võrkudel võib olla nii palju alamseadmeid, kuivõrd füüsiline kiht suudab hakkama saada, mis on sageli on see arv kuskil 1024 [17].

Andmelogija

Päikeseelektrijaamade seire ja vaheldite mõõteväärtuste telemeetria ja andmesalvestus tagatakse andmelogija (*data logger*) kaudu. Üldiselt kasutatavad telemeetriasisüsteemid koosnevad anduritest, mis mõõdavad ja salvestavad suursi nagu alalis- ja vahelduvvool ning pinge, meteoroloogilised andmed, kiirgustihedus ja temperatuur päikesepaneeli pinnal [19]. Andmelogija võib olla inverterisse sisseehitatud või väline andmesalvestaja ning opereerida kas traadiga või traadita sidesüsteemi najal sõltuvalt andmete edastamiseks olenevalt rakendusest ja päikeseelektrijaama topoloogiast [19].

1.4.2 Andmeside aegviide

Nagu varem mainitud kasutatakse päikeseelektrijaamades päikeseelektrijaama inverterite juhtimiseks kesksel kontrolleri, mille andmeside võimaldatakse teatud sidekanalite abil ja mille juhtsignaalid mõjutavad oluliselt elektrijaama dünaamikat [20]. Enimlevinud rakendustes ühildub päikeseelektrijaamades iga muunduri juhtseade kesk-kontrolleriga Modbus TCP protokolliga kaudu. Arvestades, et tegu ei ole ideaalselt reaajas toimiva protokolliga ja olenevalt süsteemi sõlmede arvust ja kaugusest, tekib kesk-kontrolleri ja inverterite vahelises andmeedastuses sageli varieeruv või konstantne aegviide. Selle tõttu hilinevad kesk-kontrollerilt saadetavad juhtkäsud ja tagasisidena saadavad mõõteväärtused, halvendades suletud juhahela korrektset toimivust ja sagedustundlikkust [21].

Kui andmesidekanali aegviite mõjutusi ei võeta arvesse ega kompenseerita, ei pruugi päikeelektrijaama võnkesummutus õigesti toimida, mistõttu võib see elektrisisüsteemi ebastabiilsust isegi suurendada [20]. Lisaks võnkesummuti enda funktsionaalsuse halvenemisele võib ka aegviide suletud ahelaga päikeseelektrijaama juhtsisüsteemis koguni tekitada süsteemi lisanduvaid madalsageduslikke võnkumisi [22], s.t. halvendada igasuguste juhtsisüsteemide tööd, kuna võrguinverterid töötavad tavaliselt võimsuse reguleerimise režiimis, järgides seadme kontrolleri sättepunkte. On kindlaks tehtud, et andmeside viited mõjutavad eriti nõrkude võrkude stabiilsust [22].

Aegviite pikkust mõjutavad tegurid on seotud sidekanalite andmeliikluse tihedusega, ülekoormatusega ning marsruutimisprotseduuriga sidevõrgus. Vastavalt artiklile [20] leiti, et keskse tsentraalse kontrolleri ja inverterite vahelise andmeside aegviite keskmine pikkus on 300 ms, kuid võib varieeruda 50 millisekundist kuni 750 millisekundini. Vastavalt dokumendile „Euroopa Komisjoni määruse nr 2016/631

artikkel 7 lõike 4 alusel Elering AS-i poolt kehtestatud siseriiklikud sätted elektritootmisüksuste võrku ühendamise nõuete kohta" [23] on inertsita tootmismoodulite suurim lubatud algviivitus 0,5 sekundit.

Andmeside aegviite matemaatiline esitus

Aegviited juhtsüsteemides toovad kaasa ka hilineva faasinihke, mis mõjutab juhtkontrolleri jõudlust ja elektrisüsteemi dünaamikat. Aegviited modelleeritakse tavaliselt esimest järku Padé lähendusega järgmise ülekandefunktsioonina [24]:

$$G_{\text{Pade}} = \frac{1 - \frac{\tau}{2}s}{1 + \frac{\tau}{2}s} \quad (1.25)$$

kus τ on ajaviite pikkus. Aegviidet olekuruumi kujul saab esitada järgmiselt:

$$\begin{aligned} \Delta x_d &= A_d \Delta x_d + B_d \Delta u_d \\ \Delta y_d &= C_d \Delta x_d + D_d \Delta u_d \end{aligned} \quad (1.26)$$

kus Δx_d on viite olekuvektor, Δu_d viite sisendvektor ja Δy_d on ajaviite väljundvektor [24]. Maatriksid A_d , B_d , C_d ja D_d on võimalik lahti kirjutada viitevaba süsteemi olekuruumi võrrandite baasil:

$$A_1 = \begin{bmatrix} A & 0 \\ B_d C & A_d \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} B \\ B_d D \end{bmatrix}, \quad C_2 = [D_d C \quad C_d]$$

kus A , B , C ja D on lineariseeritud süsteemi mudeli maatriksid [24].

Aegviitega süsteemi diferentsiaalvõrrandid

Elektrisüsteemide siirdeprotsesside käitumist aegviite lisandumisel saab formuleerida mitte-lineaarsete diferentsiaal-algebraaliste võrrandite süsteemina:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t), \mathbf{x}(t - \tau), \mathbf{y}(t - \tau)) \\ \mathbf{0} &= \mathbf{g}(\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t), \mathbf{x}(t - \tau), \mathbf{y}(t - \tau)) \end{aligned} \quad (1.27)$$

kus $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ ja $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^m$ on oleku- ja algebraalsed muutujad ning τ on andmeside aegviide [25]. Lineariseerides süsteemi soovitud tööpunkti, saab aegviitega elektrisüsteemi mudeli esitada lineaarsete diferentsiaalvõrrandite kujul:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_0 \mathbf{x}(t) + \sum_{i=1}^{i_m} \mathbf{A}_i \mathbf{x}(t - \tau_i) \quad (1.28)$$

kus \mathbf{A}_0 on olekumaatriks, \mathbf{A}_i on aegviite-maatriks ja $i_m \in \mathbb{R}^+$ on viidete arv [25]. Olekuruumi maatriksid on kirjeldatud alajaotises 1.1.3.

Esitades aegviitega võrrandi kujul $\mathbf{x}(t) = e^{-\lambda t} \mathbf{v}$, kus \mathbf{v} on mitte-triviaalne omavektor ja λ on omaväärtus. Seejärel saab võrrandi karaktiseeriva võrrandi esitada [26]:

$$\Delta(\lambda)v = \mathbf{0}$$

$$\Delta(\lambda) = \lambda I - A_0 - \sum_{i=1}^{i_m} A_i e^{-\lambda \tau_i} \quad (1.29)$$

Võrrandi ruutjuured määravad ka süsteemi stabiilsusomadused [26].

1.4.3 Ülevaade andmeside aegviite kompenseerimismeetoditest

Teaduskirjanduses on uuritud mitmeid andmeside aegviitest tuleneva ebastabiilsuse kompenseerimise meetodeid. Näiteks hajumise teisendus (*Scattering Transformation*) on meetod, mis muudab juhtsüsteemi passiivsemaks, millega võib leevendada viitest tulenevaid efekte ja aidata kaasa süsteemi stabiliseerumisele. Smithi ennustaja on tuntud oma lihtsuse ja korrektse toimivuse poolest, kuid on mudelite mittevastavuse suhtes väga tundlik [21]. Libiseva pinna juhtimismeetod (*Sliding mode control* - SMC) on tuntud kui tüüpiline juhtimisstrateegia ebakindlate ja muutliku pikkusega kommunikatsiooniviitega süsteemide jaoks, kuna see on lihtsasti rakendatav ja reageerib äärmiselt kiiresti dünaamilistele muutustele süsteemis [27].

Teadagi võib inertsi puudumine muundurites potentsiaalselt esile kutsuda elektrivõrgu ebastabiilsuse. Virtuaalse inertsi kasutamine nõrkades elektrivõrkudes mitte ainult ei paranda üldise stabiilsuse probleemi, vaid ka pakub tuge andmeside aegviitest tuleneva ebastabiilsuse kompenseerimisel [28]. Lisaks mainitud meetoditele on teaduskirjanduses välja pakutud mitmeid andmepõhiseid, hübriidseid või edasiarendusega andmeedastuse viite kompenseerimistehnikaid. Näiteks selle probleemi lahendamiseks laiseiresüsteemides (*Wide-Area Measurements Systems* - WAMS) on välja pakutud hägus-närvivõrgul (*neuro-fuzzy network*) põhinev adaptiivne meetod eesmärgiga kompenseerida muutuva pikkusega aegviidet [29]. Sarnaselt on võimalik rakendada meta-heuristilist parveintellekti (*swarm intelligence*) optimeerimisülesandel põhinevat kompenseerimis-metoodikat [30].

Järgnevalt on kirjeldatakse mõnesid eelnimetatud meetodeid detailsemalt, kuid on oluline mainida, et käesolev magistritöö pühendub aga põhiliselt ainult lihtsamatele andmeside aegviite kompenseerimistehnikatele, et tagada võnkesummutite funktsionaalsus.

Smith'i meetod

Smithi (1959) esitatud Smithi ennustaja struktuur oli esimene ja nüüdseks hästi tuntud surnud aja (*dead time*) kompenseerija [31]. Smithi ennustaja (*Smith Predictor* - SP) meetod eemaldab viitekomponendi süsteemi juhtahelast, kasutades aegviite struktuurimudelit ja elektrisüsteemi täpset modelleerimist. Smithi meetodi tööprintsiipt

seisneb elektriijaama aegviite kompenseerimises elektriijaama mudeli ülekandefunktsiooni (*Transfer Function* – TF) ja hinnangulise viite suuruse kaudu [21]. Sellega on SP võimeline arvesse võtma süsteemi mittelineaarselt olemust ja elimineerides aegviite suudab ette ennustada süsteemi käitumist [32]. Meetodi kasutamiseks ei ole vaja juhtsüsteemi lisada täiendavaid sensoreid [32].

Lisaks klassikalisele Smith'i ennustajale on vahel vaja kasutada selle modifitseeritud versiooni või edasiarendusi. Surnud aja kompenseerimisel põhinevate meetodite suurim puudus on nende vähenenud efektiivsus teatud protsessimudelites, milles nende ülekandefunktsioon on ebaratsionaalne ja aegviidet ei ole võimalik ülekandefunktsioonist otsekoheselt elimineerida [33]. Selle lahendamiseks üldistatud Smith'i ennustaja (*Generalized Smith Predictor*) puhul näiteks eemaldatakse mudelist viide, mis on käsitletud parema kompleks-pooltasandi (RHP – *Right Half Plane* - seondub süsteemi ebastabiilsete omadustega) nullidena [33]. Teine võimalus teadmata pikkusega viitega süsteemi ebastabiilsuse probleemile lähenemiseks on rakendada häiringute jälgijaga (*Disturbance Observer*) Smith'i ennustajat, mida kasutatakse laialdaselt mitmetes mehhatroonika süsteemides [34].

Tuletise meetod

Smithi ennustaja on kõige laialdasemalt kasutatav aegviite kompenseerimise meetod, aga praktikas ei pruugi aga tehniliste, turvalisuse ja/ või omandiga seotud probleemide tõttu olla võimalik juhtmeetodit rakendada [26]. Tuletisel põhineva aegviite kompenseerimismeetodi rakendamine on palju otsekohesem ja lihtsam kui mitmed teised meetodid. Konkreetne meetod põhineb mõõdetava suuruse esimesel tuletisel ja selle mudel formuleeritakse neutraalse viite diferentsiaalvõrranditena. Selle kompensatsioonitehnika põhieesmärk elektrisüsteemi rakendustes ei ole originaalsignaali täielik jäljendamine, vaid pigem süsteemi toimivuse parandamine aegviitega süsteemi puhul [26].

Libiseva pinna (*Sliding Mode Control* - SMC) meetod

SMC meetod on samuti üks süsteemi mudelist sõltumatuid meetodeid nagu on seda tuletise meetod, mis põhineb libiseva pinna tehnikal, millega fikseeritakse süsteemi hetkeseisu maatriks (*snapshot matrix*), mida kasutatakse süsteemi dünaamika hindamiseks [35]. Meetodit on lihtne rakendada ega ei nõua suurt arvutusvõimekust ning toimib hästi mittelineaarsete ja määramatute parameetritega süsteemide puhul [35].

Virtuaalse inertsiooni meetod

Kasutades päikeseelektrijaama muundurite juhtimismehhanisme on võimalik süsteemi inertsuse suurendamiseks rakendada virtuaalse inertsiooni kontseptsiooni (tavaliselt vahemikus 1 ms kuni mõnikümne sekundit) [28]. Sünkroonvõimsuse kontrollid on levinud topoloogia virtuaalse inertsiooni rakendamiseks, sünteesides sünkroongeneraatori elektromehaanilisi ja elektrilisi omadusi. Kasutades virtuaalset inertsiooni ja vastavaid summutustegureid, sellega omakorda reguleerides vaheldi väljundagedust, on võimalik võrgusageduse kõrvalekalle neutraliseerida [28]. Kuid see meetod ei pruugi osutada kõige lihtsamaks, kuna eeldab sünkroonmasina dünaamikavõrrandi (*swing equation*) virtuaalset emuleerimist [36].

Süsteemi madalasageduslike võnkumiste olemus sõltub suuresti sünkroniseerimismehhanismi ja inertsivõime vahelisest seosest [36]. Sünteetilise inertsiooni meetodi kasutamisel tuleb arvesse võtta, et selle käitumine inverteri võrku järgivas (*grid-following*) režiimis erineb võrku moodustavast (*grid-forming*) režiimist. Näiteks sünteetilist inertsiooni võimaldava inverteri opereerimisel võrku järgivas režiimis võib võnkesummutus olla üpris efektiivne, kuid võrku moodustavate režiimide võib see funktsionaalsus koguni põhjustada madala sagedusega võnkumiste märkimisväärset suurenemist [36].

2 SÜSTEEMI MUDELI ÜLESEHITUS JA METOODIKA

Magistritöö juhtumuuring on koostatud selliselt, et süsteem ei oleks ülemäära keeruline, kuid tooks hästi välja madalasagedusliku võnkumise ja süsteemi dünaamilise ebastabiilsuse häiringu korral. Suuresti põhineb uurimus päikeseelektrijaama juhtsüsteemidel ja muud jõukomponendid esitatakse agregeeritud kujul.

Tarkvara

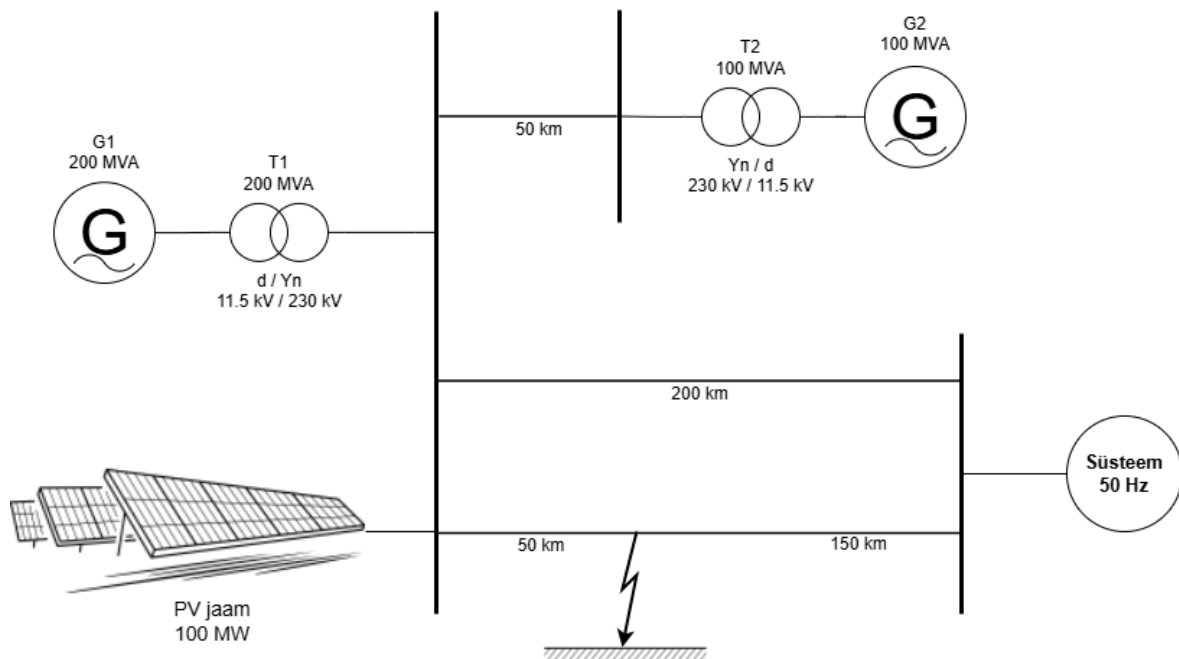
Uurimistöö mudeli ülesehitus põhineb peamiselt teadusartiklite analüüsil ja päikeseelektrijaamade komponentide ja juhtsüsteemide andmetel. Elektrisüsteemi ja päikeseelektrijaama talitluse modelleerimiseks kasutatakse tarkvara RSCAD FX 2.3, mis suunab simulatsiooniprotsessi elektrisüsteemi reaajasimulaatorile RTDS (*Real-Time Digital Simulator*). Tarkvara simulatsioonide ajasamm on 50 mikrosekundit. RTDS-iga on võimalik elektrisüsteemide dünaamikat reaajas simuleerida. See põhineb arvutimoodulitest koosneval riistvaral HIL (*Hardware-In-the-Loop*), mis võimaldab andmeedastust reaajas.

Lihtsamateks arvutusteks kasutatakse MS Excelit ning keerukamateks arvutusteks ja peamiseks analüüsiks Mathworks MATLAB tarkvara.

2.1 Lähteandmed ja süsteemi kirjeldus

2.1.1 Elektrisüsteemi mudeli ülevaade

Elektrisüsteemi võnkumiste simuleerimiseks ja summutamiseks koostatud süsteem koosneb kahest väljepoolusega sünkroongeneraatorist, ühest 100 MW-st päikeseelektrijaamast, ülekandeliinidest ja trafodest. Joonis 2.1 illustreerib simulatsioonimudelit, kus on häiringu ja ebastabiilse võnkumise tekitab ühefaasiline lühis, mille tulemusel lülitatakse konkreetne kõrgepingeliin välja. RSCAD tarkvaras modelleeritud mudeli skeem on näidatud lisas 1. Lühise korral jääb kahest generaatorist ja päikesepargist koosnevat elektrisüsteemi tugeva 50 Hz süsteemiga siduma ainult üks 230 kV liin. Lühise tekke asukoht on suhteliselt lähedal generaatoritele, mistõttu on häiringu toime suurem. Mudelis on päikeseelektrijaam taandatud ekvivalentsele kujule, mis eeldab madalapingetrafoode ja kaablite ekvivalentsete parameetrite arvutust.



Joonis 2.1. Elektrisüsteemi mudeli põhimõtteskeem

Generaatorid

Häiringu tekkimiselt jäävad sünkroongeneraatorid (tabel 2.1) üksteise suhtes võnkuma.

Tabel 2.1. Generaatorite parameetrid

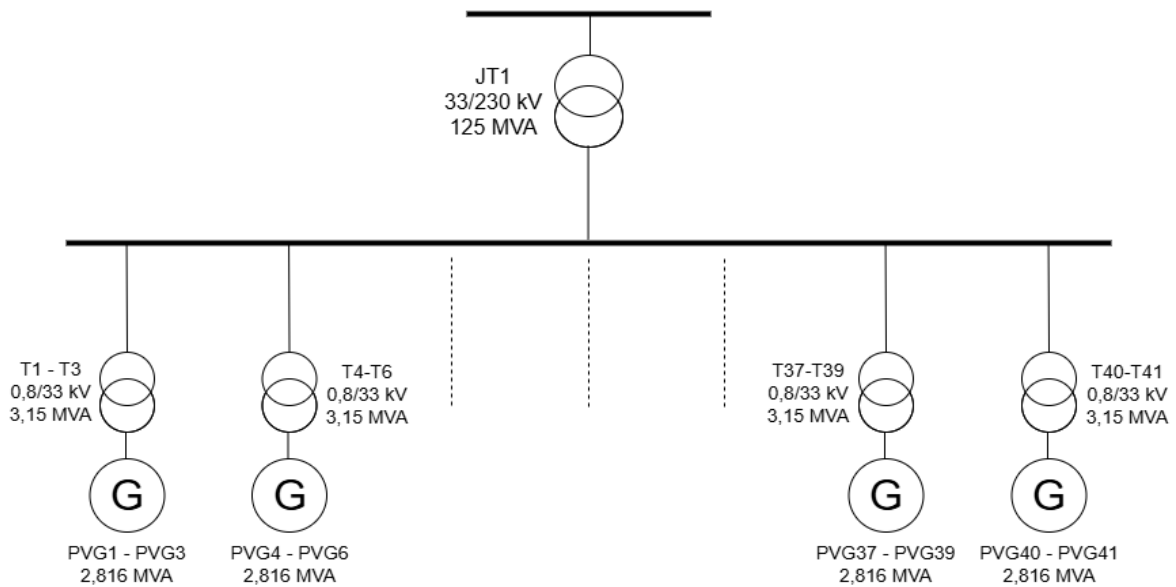
Parameeter	Generaator 1 (G1)	Generaator 2 (G2)
Nimivõimsus S (MVA)	200	100
Staatori pingeline V_L (kV)	11.5	11.5
Inertsikonstant H (MWh/MVA)	3.1	4.0
Mehaaniline summutustegur D	0.04	0.03
Staatori aktiivtakistus R_s (s.ü.)	0.004	0.004
Staator puistetakistus X_{ls} (s.ü.)	0.163	0.163
Sünkroontakistus X_D ja X_Q (s.ü.)	2.031 ja 1.956	2.031 ja 1.956
Mööduv takistus X_D' (s.ü.)	0.34	0.34
Ülimööduv takistus X_D'' ja X_Q'' (s.ü.)	0.241 ja 0.237	0.241 ja 0.237
Mööduv ajakonstant T_{d0}' (sek)	3.781	3.781
Ülimööduv ajakonstant T_{d0}'' ja T_{q0}'' (sek)	0.032 ja 0.074	0.032 ja 0.074
Ergutusüsteemi tüüp	IEEE tüüp ST1A	IEEE tüüp ST1A
Regulaatori tüüp	IEEE tüüp 1	IEEE tüüp 1

ST1A on sünkroonmasina staatilise ergutusregulaatori tüüp, mida kasutatakse elektrijaamade generaatorite juhtimiseks [37]. IEEE tüüp 1 on kiirusregulaatori ja auruturbiini mudel (IEEEG1), mida kasutatakse auruturbiinide ja nende regulaatorite

dünaamilise käitumise simuleerimiseks [37]. Generaatoritele ei ole lisatud võnkesummutit, kuna nende eesmärk selles töös on häiringu korral võnkumise tekitamine.

2.1.2 Päikesejaama topoloogia

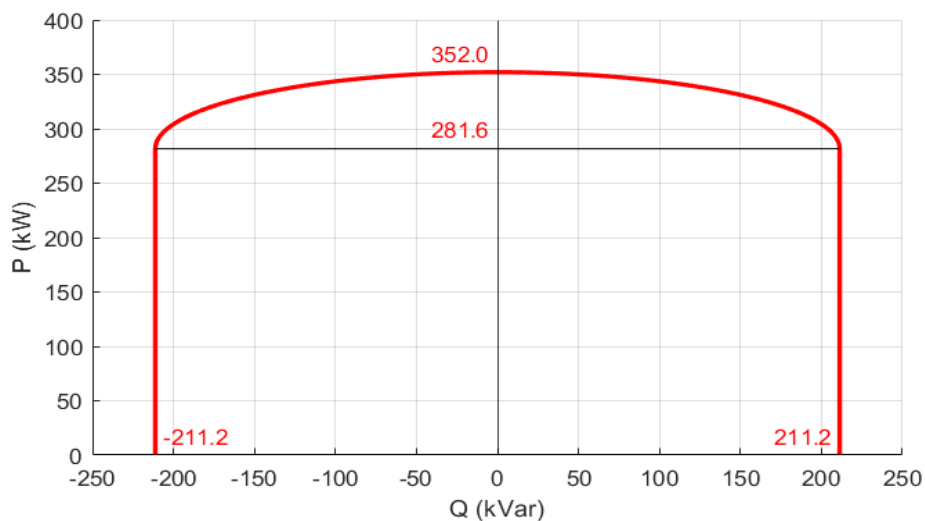
Päikeseelektrijaam koosneb liitumispunktist kõrgepingetrafast ning neljakümnest vaheldist ja madalapingetrafast. Päikeseelektrijaama lihtsustatud ülevaatlük topoloogia on näidatud alloleval skeemil (joonis 2.2) põhjalik elektriskeem on välja toodud lisis 2.



Joonis 2.2. Päikeseelektrijaama elektriskeemi topoloogia

Võrguinverterid

Joonis 2.3 näitab ühe inverteri aktiiv- ja reaktiivvõimekuse PQ kõverat. 100 MW-se päikeseelektrijaama kogunäivvõimsus on 122,9 MVA ja reaktiivvõimsus 73,74 MVAR.



Joonis 2.3. Päikeseelektrijaama ühe 352 kVA võrguinverteri PQ kõver

Trafod

Päikeseelektrijaama liitmiseks kõrgepinge võrku kasutatakse trafot JT1, mille nimiparameetrid on antud alljärgnevas tabel 2.2 ja päikeseelektrijaama vaheldid ühendatakse võrguga trafode T1-T41 abil (tabel 2.3).

Tabel 2.2. Trafo JT1 andmed

Parameeter	Kirjeldus	Ühik	Väärtus
S_n	Nimivõimsus	MVA	125
U_1	Ülempinge	kV	230
U_2	Alampinge	kV	33
$U_{k\%}$	Lühistakistus	%	12,0
	Lülitusgrupp		YNd11
	Astmelüliti	aste	+/- 9, 1,67%
P_0	Rauaskaod	kW	62,5
P_k	Vaseskaod	kW	375
$I_{t\%}$	Tühijooksu vool	%	0,7

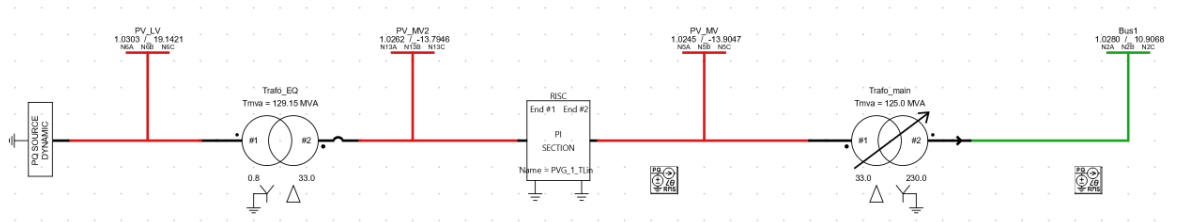
Tabel 2.3. Trafode T1 – T41 andmed

Parameeter	Kirjeldus	Ühik	Väärtus
S_n	Nimivõimsus	MVA	3,15
U_1	Ülempinge	kV	33
U_2	Alampinge	kV	0,8
$U_{k\%}$	Lühistakistus	%	7,0
	Lülitusgrupp		Dyn11
P_0	Rauaskaod	kW	1,98
P_k	Vaseskaod	kW	23,0
$I_{t\%}$	Tühijooksu vool	%	0,45

Päikeseelektrijaama reaalajasimulaatori mudel

Päikesejaama inverterid on modelleeritud dünaamilise PQ-allikana (RSCAD blokina), mis sisaldab kõiki vajalikke modifitseeritavaid parameetreid: nimiväärtuseid ja faasiluku regulaatori väärtuseid. See kujutab tarkvara mõistes endast kõrge lülitussageduse vooluallikana käituvat muundurit [38]. Faasilukustusahela ajakonstant on 0,02 s, selle PI-regulaatori proportsionaallüli koefitsient on 150 ning integraaliaja konstant 0,017 s. Joonis 2.4 näitab, et PQ-allikast eraldi on modelleeritud ekvivalentne keskpinge trafo,

ekvivalentne liin, mille parameetrite väärtused arvutati eelnevalt WECC meetodil, ja kõrgepingetrafo liitumispunktis (Bus1).



Joonis 2.4. RSCAD mudeli 100 MW päikeseelektrijaama elektriskeem

2.1.3 Ekvivalentse takistuse arvutus WECC meetodil

Simulatsioonimudeli lihtsustamiseks koondati 35 kV kaablite ja trafode parameetrid ekvivalentseteks parameetriteks vastavalt WECC meetodi kirjeldusele [39]. *Western Electricity Coordinating Council* (WECC) on andnud välja tehnilised suunised dünaamiliste elektrisüsteemi mudelite esitamiseks ja rakendamiseks, näiteks võimsusvoogude arvutusel. Õigete mudeliparameetrite korral peaks ligikaudselt hindama võimsusvoolu karakteristikuid, süsteemi aktiiv- ja reaktiivvõimsuskadusid ning pingeprofiili võrgu liitumispunktis. Kuid süsteemi lihtsustamine koondatud parameetritega pole nii üksühene, kuna nii pinge- kui vooluväärtused on elektrisüsteemi erinevates punktides mittevõrdsed. Seega ekvivalentsete parameetrite arvutamiseks on WECC välja pakkunud meetodi [39].

Ekvivalentne takistus Z_{eq} ja juhtivus B_{eq} on esitatud järgmiste valemitega:

$$Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^I Z_i n_i^2}{N^2} \quad (2.1)$$

$$B_{eq} = \sum_{i=1}^I B_i$$

kus I on lõikude arv süsteemis, Z_i on i -nda komponendi takistus, n_i tähistab fiidri lõigu järjekorranumbrit alustades fiidri lõpust ning N on generaatorite arv [39]. Kogutakistus Z_{Teq} ja ekvivalentne võimsus (MVA) MVA_{Teq} N -nda identse trafo jaoks tuletatakse järgmiselt [39]:

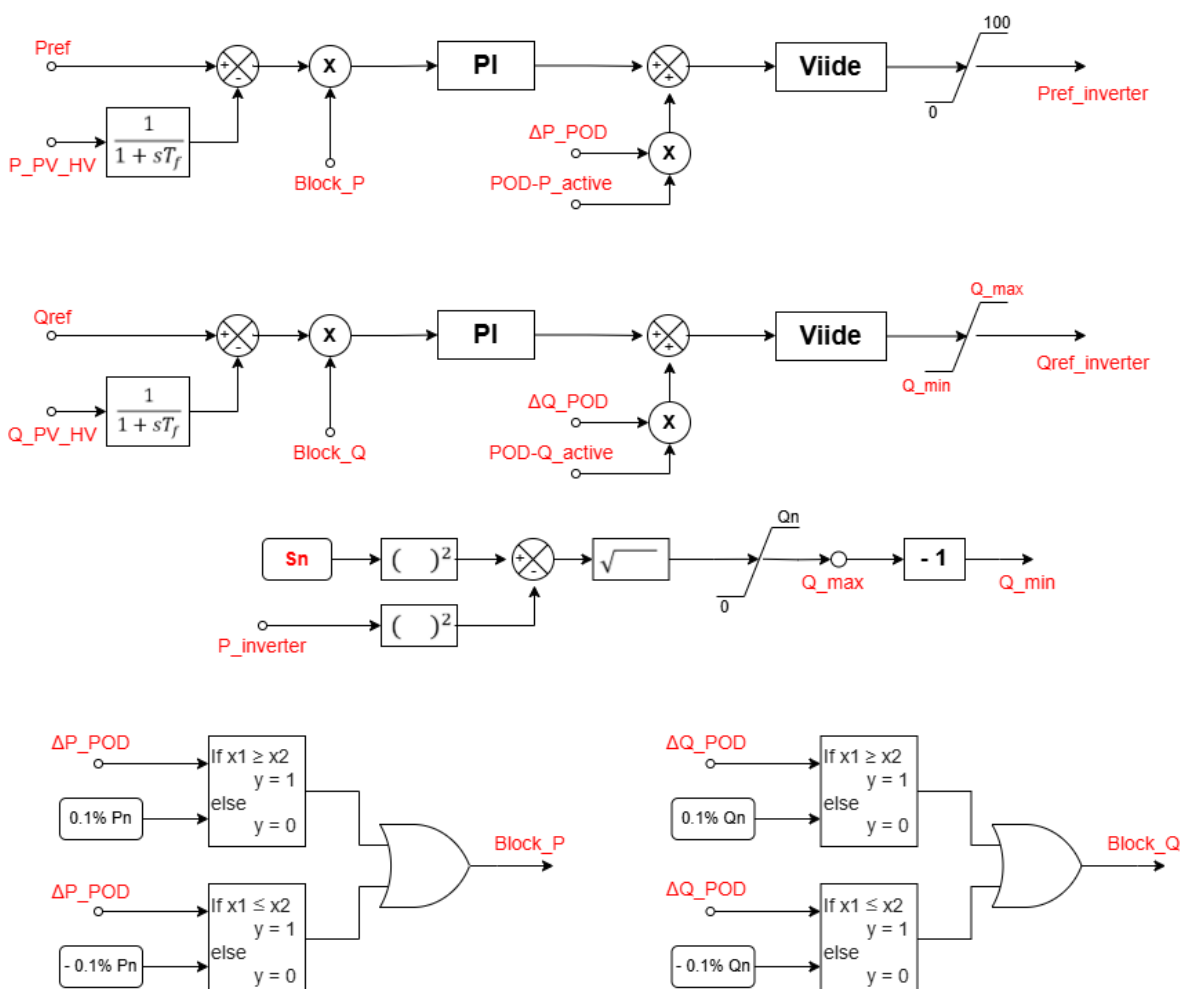
$$Z_{Teq} = Z_T \quad (2.2)$$

$$MVA_{Teq} = N \cdot MVA_T$$

Vastavalt arvutustele on modelleeritava kaabli ekvivalentsed pärijärgnevuskomponendid $R_{eq} = 0,0200 \Omega$, $X_{eq} = 0,0215 \Omega$ ja $C_{eq} = 9.7900 \mu F$. T1-T41 trafodele vastava ekvivalentse trafo vasekaod on 0.0073 s.ü. ja rauakaod 0.00063 s.ü.

2.1.4 Päikeselektrijaama juhtsüsteemid

Päikeselektrijaama juhtimine seisneb aktiiv- ja reaktiivvõimsuse sättepunkti seadmisel, mis toimub elektrijaama juhtkontrolleris (*Power Plant Controller – PPC*). Sättepunkti väärtus jagatakse üldiselt vastavalt juhtkontrolleri loogikale kõigi inverterite vahel ära, kuid konkreetse töös uuritakse päikeseparki kui üksikku ekvivalentsete komponentidena, See tähendab, et sättepunktid edastatakse mudelis läbi PI-regulaatori ekvivalentsele inverterile, mis on modelleeritud eraldiseisva blokina. Tegelikud ekvivalentsele inverterile edastatavad sättepunktide väärtused on piiratud vastavalt päikeseelektrijaama tehnilisele võimekusele, mis on määratud PQ-kõveraga. Võnkumiste summutamiseks loodud võnkesummutite POD-P ja POD-Q lülid liidetakse samuti elektrijaama keske juhtkontrolleri juhtahelatesse (joonis 2.5).



Joonis 2.5. Päikeselektrijaama tsentraalse juhtkontrolleri (PPC) juhtloogika skeem

Päikesepaneelide ja inverterite juhtsüsteemid on modelleeritud PQ-blokina, kus inverteritele edastatav aktiiv- ja reaktiivvõimsuse sätteväärtus on vastavalt „Pref_inverter“ ja „Qref_inverter“. PO-bloki aktiivvõimsuse juhtimiseks kasutatakse d-

telje juhtahelat, mis määrab voolutugevuse referentspunkti i_d , ja reaktiivvõimsuse reguleerimiseks q-telje ahelat, määrates voolutugevuse i_q [38]. Blokk sisaldab sisemist inverteri faasiluku juhtahelat, mis jälgib võrgu pinget nurka liitumispunktis ning sünkroniseerib muunduri (inverteri) juhtimissüsteemi vahelduvvooluvõrguga [38]. Selle parameetrid valiti samuti vastavalt tavapärasele võrgu konfiguratsioonile.

PI-regulaatori parameetritena kasutati tavapäraseid võrgule sobivaid väärtusi. PI-regulaatori parameetrid sätteväärtuse järgi juhtimisel on erinevad aktiiv- ja reaktiivvõimsuse juhtahelates. Proportsionaalse lüli konstant aktiivvõimsuse juhtahelas on 0,3 ja reaktiivvõimsuses PI-regulaatoris 0,1. Integraatorlüli ajakonstant on vastavalt 0,33 ja 3,33 sekundit. Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse mõõteväärtuste madalpääsfiltri ajakonstandid on 0,02 sekundit.

Seega mudelis juhitakse vaheldite sättepunkte vastavalt sätteväärtusele ja võnkesummuti väljundväärtusele. Sättepunkti järgi juhtumine blokeeritakse, kui võnkesummuti väärtus on kõrgem kui 0,1% nimivõimsusest. Selle eesmärk on vältida kahe juhtsüsteemi funktsionaalsuse üksteisele vastu töötamist ning hoida võnkesummutuse funktsionaalsus prioriteetsena.

2.2 Juhtumiuuringu formuleerimine

Nagu varasemalt kirjeldatud tekib süsteemis häiringu korral ebastabiilne võnkeprotsess, mis ei sumbu iseeneslikult ja mille summutamiseks rakendatakse võnkesummuteid.

2.2.1 Operatiivparameetrite kirjeldus

Et hinnata võnkesummutite võimekust ebastabiilsete võnkumiste summutamisel, on operatiivparameetrid valitud selliselt, et olukord oleks võnkesummutite jaoks võimalikult keeruline. Järgnevalt analüüsitakse kahte juhtumit stsenaariumi, millest esimene on summutuse seisukohalt raske juhtum (stsenaarium A) ja teine on eriti raske juhtum, mis on võnkesummutite jaoks selle võimekuse piiril (stsenaarium B). Juhtumite erinevus seisneb sünkroongeneraatorite talitusparameetrites, mis konkreetsel juhul tähendab generaatorite väljundvõimsuste muutust (tabel 2.4).

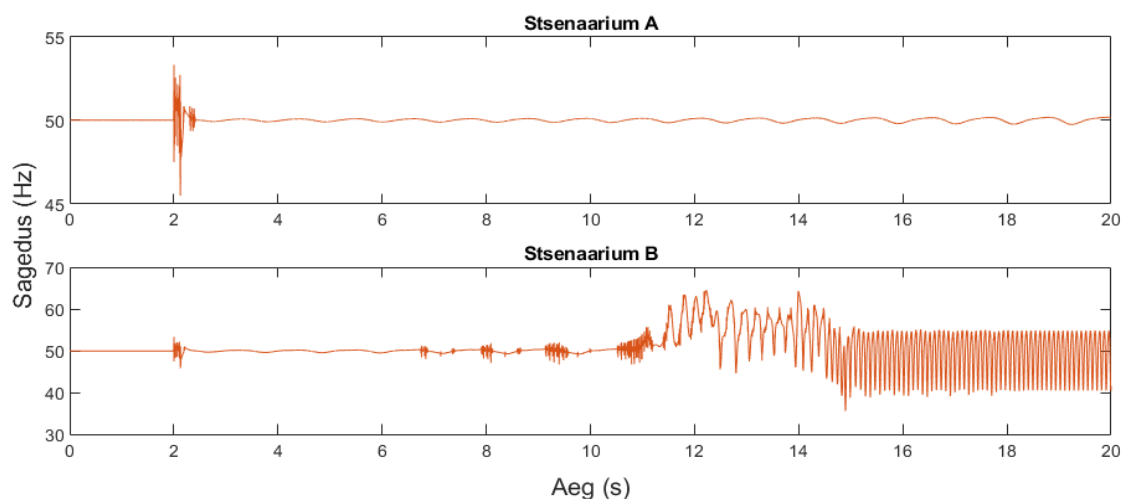
Tabel 2.4. Sünkroongeneraatorite talitusparameetrid kahe erineva juhtumit korral

Juhtum	Generaator 1 (P_G1)		Generaator 2 (P_G2)	
	s.ü.	MW	s.ü.	MW
Stsenaarium A	0.52	104	0.65	65
Stsenaarium B	0.55	110	0.90	90

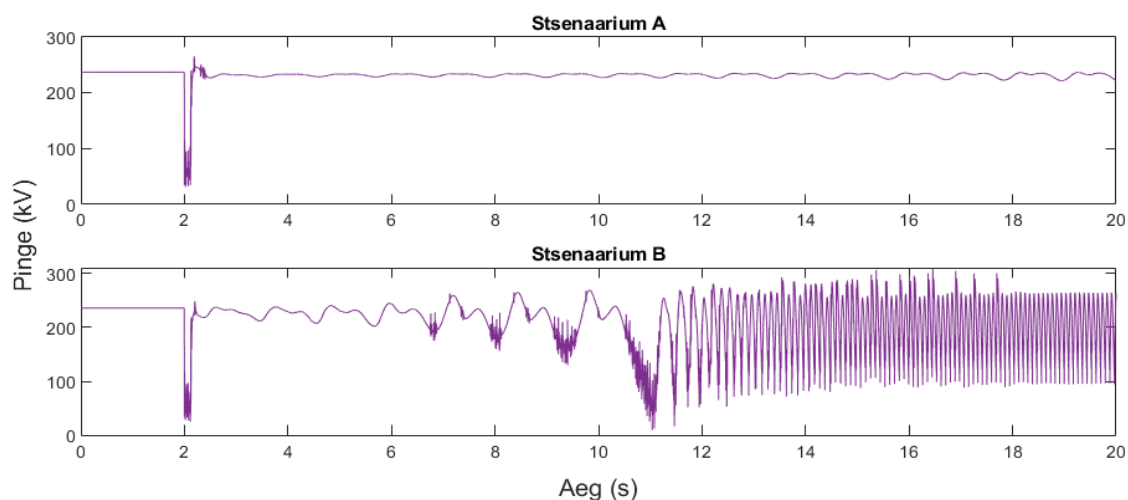
Päikeseelektriijaama parameetriteks valiti mõlemal juhul 90 MW, mis on 90% nominaalvõimsusest ning võimaldab võnkesummutil (POD-P) töötada täies mahus - 80 MW ja 100 MW vahel. Reaktiivvõimsuse seisukohalt hoitakse liitumispunkti enamasti vaikimisi sätteväärtust 0 MVAR. Illustreeriv väljavõte RSCAD kasutajaliidese operatiivpaneelist on näidatud Lisas 3.

2.2.2 Süsteemi stabiilsus ilma võnkesummutita

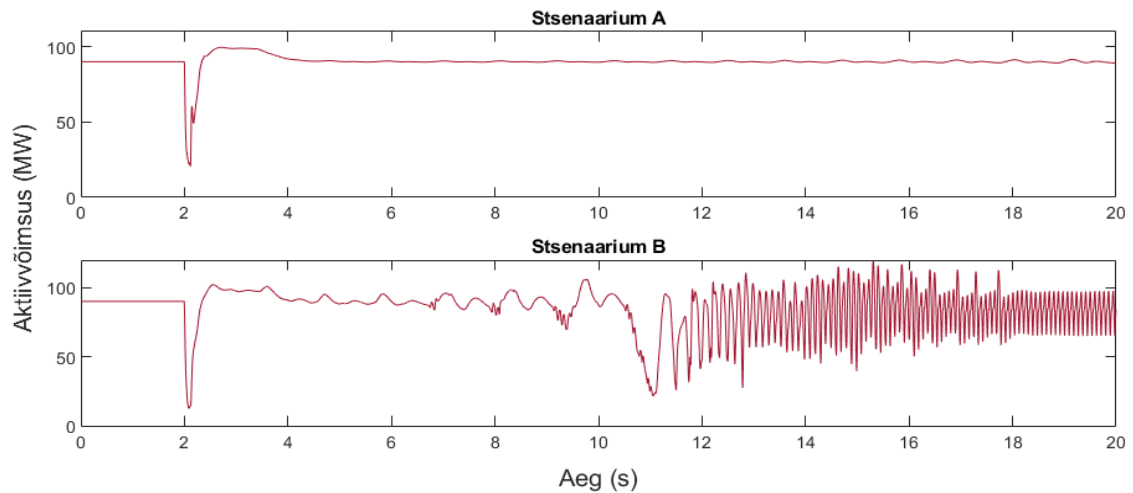
Süsteemi stabiilsust häiringu tekkimisel hinnatakse kahe stsenaariumi raames, milleks on raske ja eriti raske juhtum. Enne häiringu teket on süsteem stabiilne ja juhtsüsteemi sätteväärtused saavutatud. Järgnevatel joonistel illustreeritakse süsteemi ebastabiilseid võnkeprotsesse võnkesummutite puudumisel.



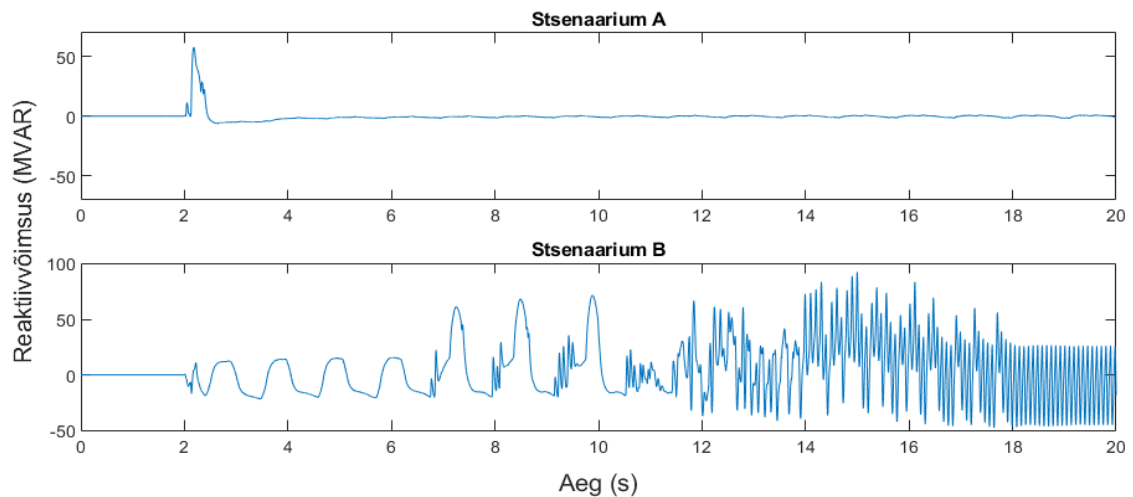
Joonis 2.6. Võrgusagedus ilma võnkesummutita päikesepargi liitumispunkti raske juhtumi (stsenaarium A) ja eriti raske juhtumi korral (stsenaarium B)



Joonis 2.7. Pinge ilma võnkesummutita päikesepargi liitumispunkti raske juhtumi (stsenaarium A) ja eriti raske juhtumi korral (stsenaarium B)

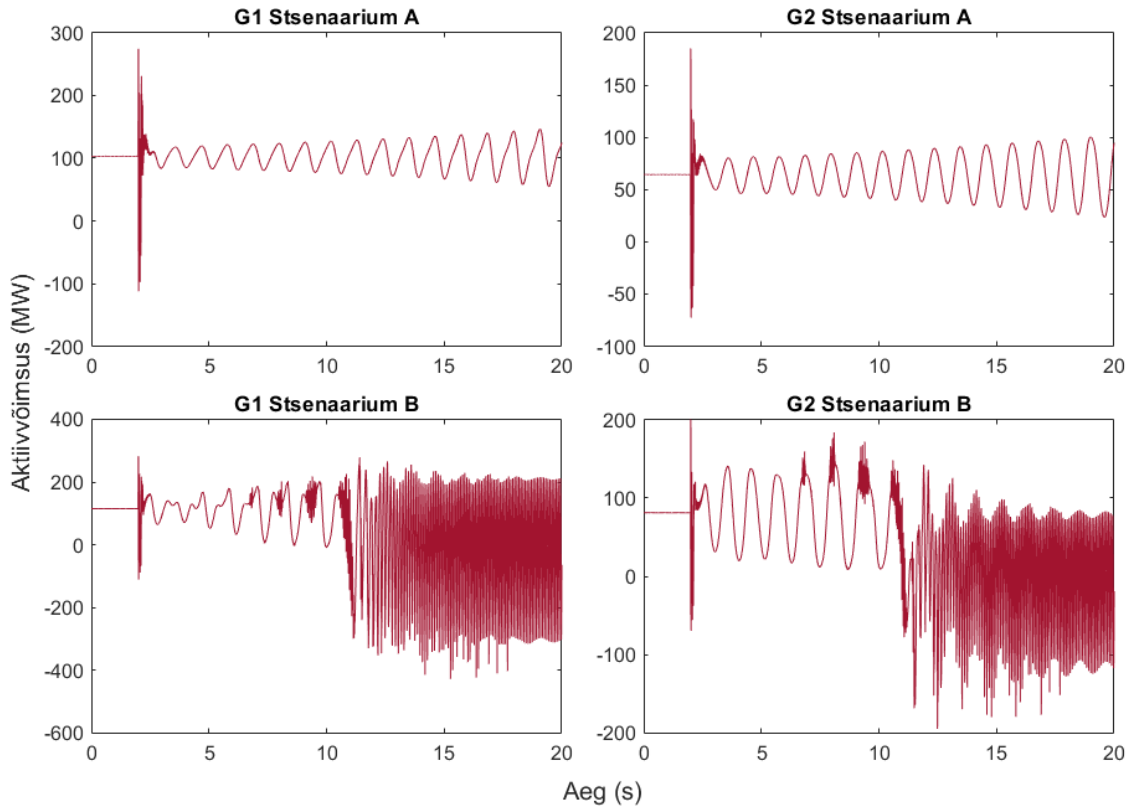


Joonis 2.8. Aktiivvõimsus ilma võnkesummutita päikesepargi liitumispunktis raske juhtumi (stsenaarium A) ja eriti raske juhtumi korral (stsenaarium B)



Joonis 2.9. Reaktiivvõimsus ilma võnkesummutita päikesepargi liitumispunktis raske juhtumi (stsenaarium A) ja eriti raske juhtumi korral (stsenaarium B)

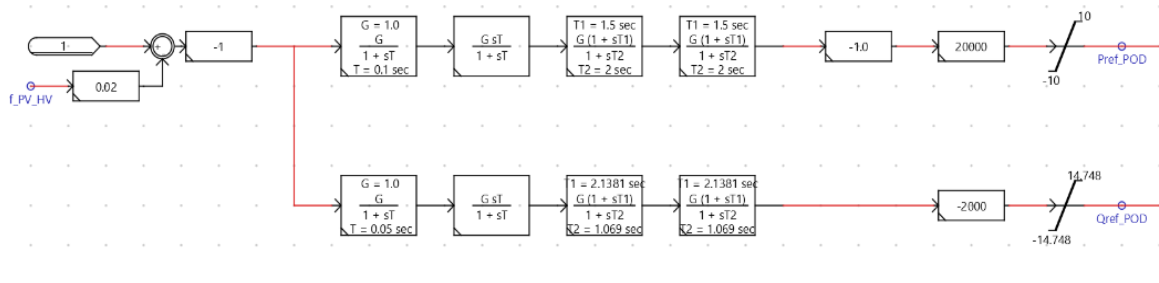
Joonised näitavad, et mõlemal juhul tekivad häiringu ilmnemisel ebastabiilsed võnkeprotsessid, kuid stsenaarium A korral võnkeamplituud sujuvalt suureneb kuni kindla väärtuseni kuni jääb ühtlaselt madalasageduslikult võnkuma. Stsenaarium B puhul on aga esimesed kolm võnget äärmiselt kriitilised, pärast mida tekivad võnkeprotsessi ka kõrgemasageduslikud komponendid ning pärast kümnendat sekundit muutub süsteem ohtlikult ebastabiilseks. Seda illustreerivad eriti hästi generaatorite väljundvõimsuse profiilid (joonis 2.10), kus generaatorid hakkavad tööle perioodiliselt mootorina. Sellist olukorda on äärmiselt oluline vältida. Joonis 2.6 näitab, et kui stsenaarium A juhul võnkeamplituud jääb 1 Hz piiridesse, siis stsenaarium B puhul tekib elektrisüsteemi jaoks katastroofiline olukord, kus sagedus varieeruks 40 Hz ja 60 Hz vahel ja selliselt pole süsteemil töötada enam võimalik.



Joonis 2.10. Sünkroongeneraatorite (G1 ja G2) aktiivvõimsused raske juhtumi (stsenaarium A) ja eriti raske juhtumi korral (stsenaarium B)

2.3 Dünaamilise stabiilsuse analüüs ja võnkesummutite disain

Võnkumiste summutamiseks loodud juhtahelad (joonis 2.11) koostati vastavalt teooria peatükis kirjeldatud kontseptsioonile. Võnkesummutite juhtahelate parameetrite leidmiseks kasutati nii kirjandusest kättesaadavaid suuniseid kui ka modaalanalüüsi, mida kirjeldati raporti teoreetilise ülevaate peatükis.



Joonis 2.11. Reaalajasimulaatori mudeli võnkesummutite POD-P ja POD-Q juhtahelad

Võnkesummutite juhtahelate parameetrite arvutuskäik on kirjeldatud järgmises alajaotises.

2.3.1 Vönkesummuti parameetrid aegviiteta juhtsüsteemis

Vastavalt [15] suunistele nii vönkesummuti-P kui vönkesummuti-Q võimendustegurid K_P ja K_Q võiksid olla vahemikus -400...400 s.ü. näivvõimsusest. Nagu nimigi viitab, siis võimendusteguri eesmärk on suurendada või vähendada vönkesummutuse kiirust. Kuna selles magistritöös arvutatakse vönkesummuti kompenseeriv võimsus SI-ühikutes, siis võimendustegur juba sisaldab vastavat korrutustehet. Võimendustegurid on võimalik leida ka arvutuslikult, kuid selles töös leiti need eksperimentaalselt. Tavapäraselt on vönkesummuti võimekus 5% ja 20% vahel [15] ning selles töös valiti vönkesummuti-P piirväärtusteks $\Delta P_{POD}^{min}, \Delta P_{POD}^{max} \pm 10$ MW ja vönkesummuti-Q piirväärtusteks $\Delta Q_{POD}^{min}, \Delta Q_{POD}^{max} \pm 14.748$ MVAR.

Madalpääsfiltri ajakonstandi T_f väärtused on soovituslikult vahemikus 0 – 0,20 sekundit [15], mistõttu valitud väärtus on 0,1 s. Kõrgläbipääsfiltri ajakonstant T_w võib olla 1-20 sekundit ning selles töös valiti vastavalt [15] soovitudele väärtuseks 5 s. Lisaks eelnevale on nii vönkesummuti-P kui vönkesummuti-Q ahelas kindel arv (enamasti 1, 2 või 3) inertseid-diferentseerimislülisid ehk faasi kompenseerivaid filtreid ning selles töös valiti selleks 2 filtrit, mis on üsna klassikaline lahendus. Kui vönkesummuti-P puhul ei ole nende filtrite olemasolu nii tähtis, kui juhtahel on piisavalt kiire, siis vönkesummuti-Q puhul on see oluline [15]. Faasi kompenseerivate filtrite ajakonstandid T_1 ja T_2 leitakse eksperimentaalselt või arvutuslikult. Vönkesummuti-P $T_{1,P}$ ja $T_{2,P}$ väärtused (vastavalt 1,5 sekundit ja 2 sekundit) oli võimalik leida eksperimentaalselt, et tagada piisav summutusefekt. Kuid vönkesummuti-Q puhul osutus ülesanne keerukamaks, mistõttu viidi läbi omaväärtuste analüüs ning vastavad ajakonstandid leiti arvutuslikult, mis on kirjeldatud järgmises alajaotises.

2.3.2 Perioodiliselt vönkuva signaali analüüs

Konkreetse signaalianalüüsi eesmärk on analüüsida süsteemi häiringu tõttu tekkinud vönkumiste omadusi ning leida sobivad faasi kompenseerivate filtrite ajakonstandid. Kuna RSCAD ei võimalda tarkvarasisest omaväärtuste analüüsi, teostatakse modaalanalüüs eksporditud andmetele MATLAB tarkvara abil. Analüüsi sisendandmeteks valiti häiringule kõige lähemal oleva generaatori võimsussignaali, millest eraldati alaliskomponent ja filtreeriti kiire Fourier teisenduse funktsiooni abil.

Süsteemi olekumaatriksit kirjeldavate konstantide puudumise tõttu ei ole süsteemi omaväärtuste tuletamine ainuüksi võimsussignaalist nii üksühene. Selle tõttu kasutatakse signaali analüüsimeks elektrisüsteemide jaoks laialt levinud *Prony* meetodit, mis on mõõteandmetel põhinev alternatiiv süsteemi dünaamika hindamiseks kui detailsed mudelid pole teada [40]. Sisuliselt on *Prony* analüüs meetod

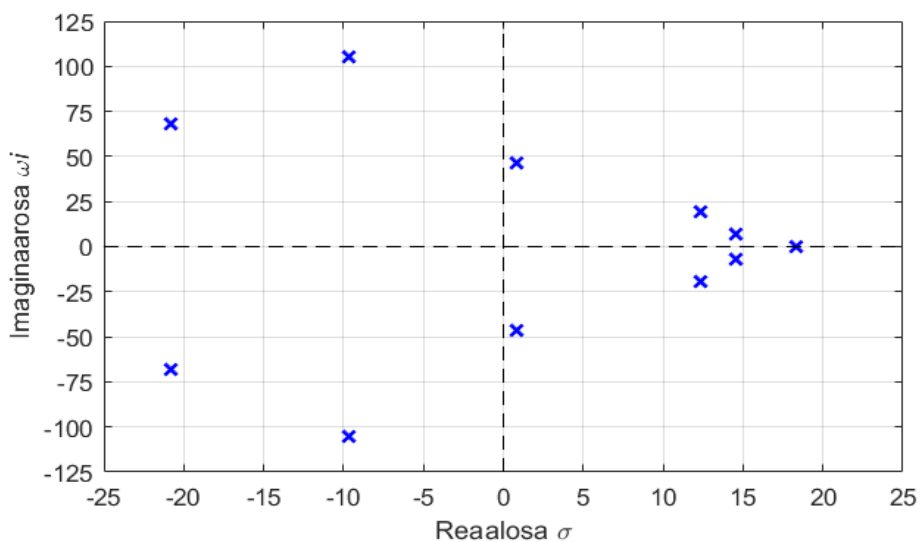
sagedusdomeenis dünaamilise ekvivalentmudeli kalkuleerimiseks kõrgemat järku elektrisüsteemi jaoks [40]. See on meetod ajadomeenis valimiandmete sobitamiseks ja modelleerimiseks eksponentsiaalse lineaarse kombinatsioonina [41]. Diskreetsel kujul:

$$y(k) = \sum_{i=1}^n R_i z_i^k \quad (2.3)$$

kus $y(k)$ on diskreetne signaal ajadomeenis, R_i i -s amplituud komplekskujul ja z_i^k on diskreetne aeg [41].

Prony meetodi rakendamisel on võimalik leida signaali omaväärtused ja vastavad sagedused. Joonis 2.12 illustreerib kaheteistkümne poolusega sobitatud mudeli omaväärtusi kärbitud vahemikus, kust on näha, et mitmed poolused asuvad parempoolsel tasandil, mis kinnitab, et süsteem ei ole stabiilne. Lisaks ebastabiilsetele võnkuvatele moodidele sisaldab süsteem ka ebastabiilseid mittevõnkuvaid ja stabiilseid moode.

Vastavalt omaväärtuste analüüsi tulemustele on võimalik ebastabiilse võimsussignaali moodid lahti mõtestada. Tabel 2.5 näitab süsteemi omaväärtusi erinevates elektromehaanilistes moodides. Analüüsi huviorbiidis on aga ebastabiilised võnkumised sagedusvahemikus 0,1...2,0 Hz. Tulemusena leiti, et kriitiline sagedus selles vahemikus on 1,17 Hz ja maksimaalne nurk, mis vajab kompenseerimist, on 19,5 kraadi.



Joonis 2.12. Omaväärtused Prony meetodil 12ndat järku lähenduse korral

Arvutuslikult leiti ka faasi kompenseerivate filtrite ajakonstandid, mis peenhäälestati eksperimentaalselt. Seega võnkesummuti-Q jaoks sobivad $T_{1,Q}$ ja $T_{2,Q}$ väärtused on vastavalt 2,138 ja 1,069 sekundit. Kui võnkesummuti-Q filtrite ajakonstandid leiti suures osas analüütiliselt, siis juhtahela võimendustegur leiti vastavalt selle efektiivsusele eksperimentaalselt.

Tabel 2.5. Elektromehaanilised moodid võnkesummutuseta süsteemis

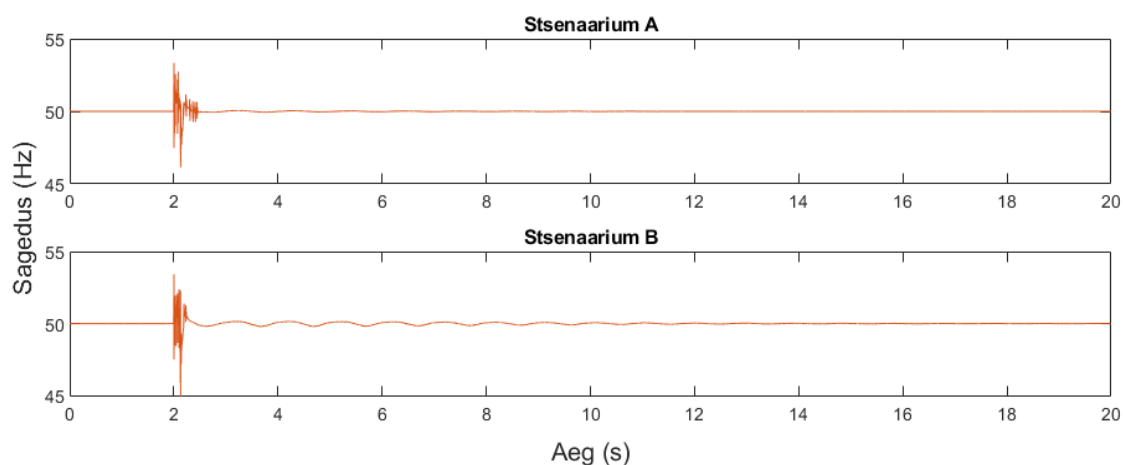
Mood	Omaväärtus	Sagedus (Hz)	Kirjeldus
1	Reaal arv > 0	0	mittevõnkuv ebastabiilsus
2, 3	14,55 ± 7,34i	1,17	ebastabiilne lokaalne võnkumine
4, 5	12,31 ± 19,24i	3,06	ebastabiilne generaatorite vaheline võnkumine
6, 7	0,84 ± 46,26i	7,36	ebastabiilne võnkumine
8 - 12		10-20	stabiilne kõrgsageduslik võnkumine

2.4 Süsteemi stabiilsus võnkesummutusega

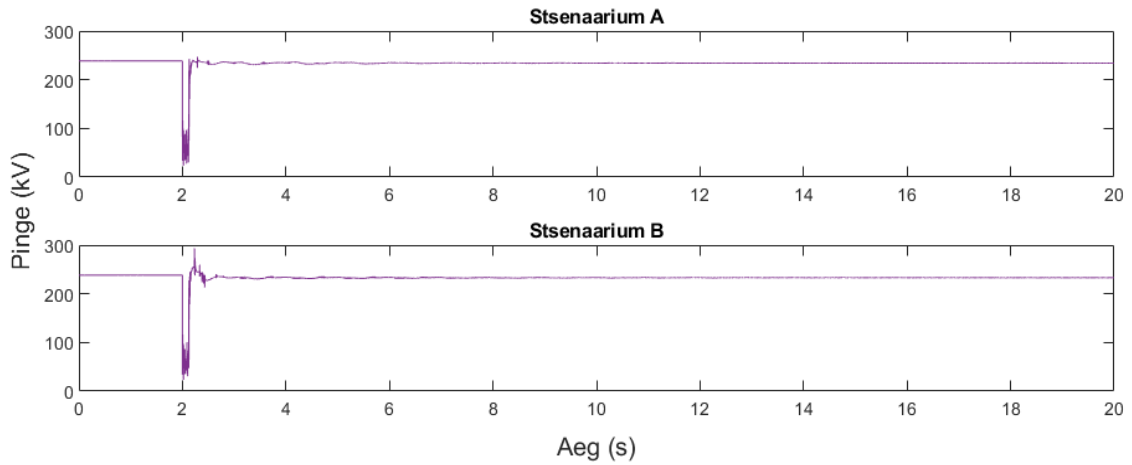
Selles alapeatükis esitatakse tulemused, mis illustreerivad erisuguste võnkesummutite efektiivsust aegviiteta süsteemis. Vastavad näited on eelduseks võnkesummutite kompenseerimismeetodite kasutamiseks ja elektrisüsteemi stabiilsuse analüüsiks andmeside aegviitega juhtsüsteemides.

2.4.1 Võnkesummuti-P mõju

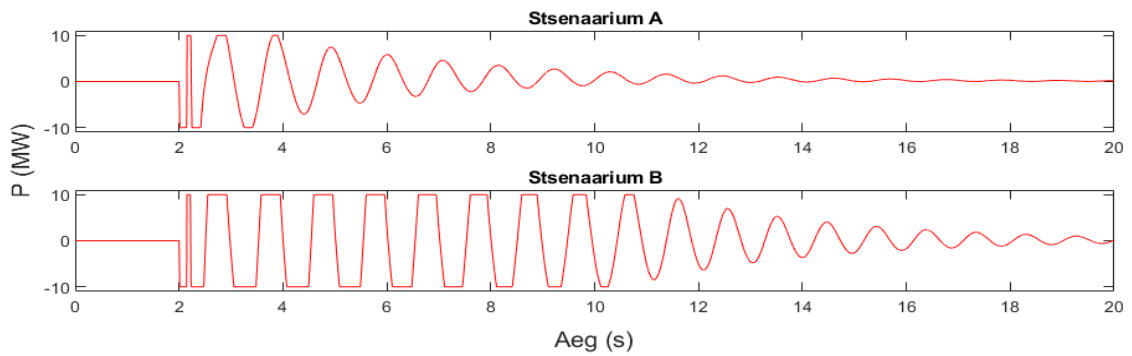
Järgnevatel joonistel näidatakse süsteemi võnkeprotsesse võnkesummutiga-P. Analüüsides võnkesummuti-P toimivust, joonis 2.13 ja joonis 2.16 viitavad, et dünaamiline ebastabiilsus suudetakse summutada nii rasketes kui eriti rasketes operatiivtingimustes. See tähendab, et võnkesummuti-P juhtahel on efektiivselt konstrueeritud. Kui esimesel juhul saavutatakse stabiilne olukord maksimaalselt kümne sekundiga, siis teisel juhul kulub võnkesummutil ligikaudu 15-20 sekundit süsteemi stabiilse seisundi saavutamiseks.



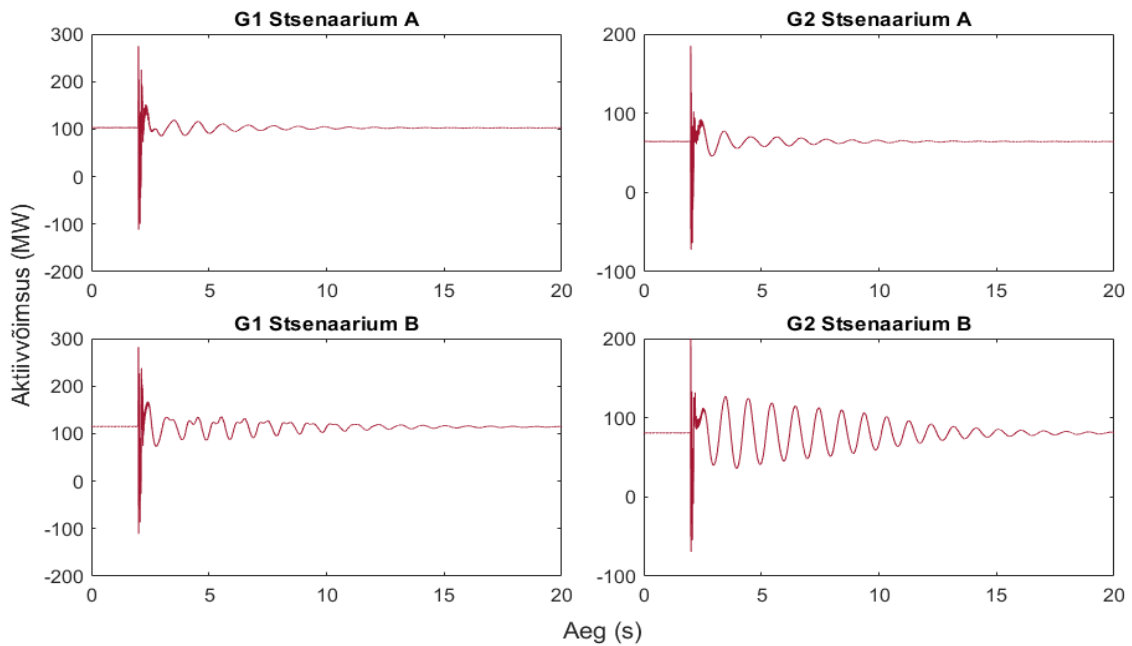
Joonis 2.13. Võrgusagedus võnkesummutiga-P päikesepargi liitumispunktis raske juhtumi (stsenaarium A) ja eriti raske juhtumi korral (stsenaarium B)



Joonis 2.14. Võrgusagedus võnkesummutiga-P päikesepargi liitumispunktis raske juhtumi (stsenaarium A) ja eriti raske juhtumi korral (stsenaarium B)



Joonis 2.15. Võnkesummuti-P rakendumine raske juhtumi (stsenaarium A) ja eriti raske juhtumi korral (stsenaarium B)

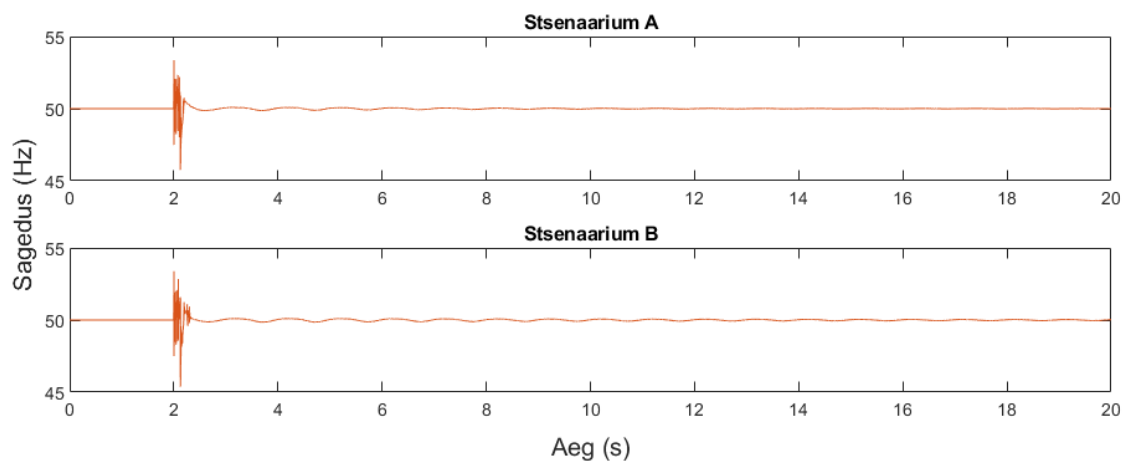


Joonis 2.16. Süncroongeneraatorite (G1 ja G2) aktiivvõimsused raske juhtumi (stsenaarium A) ja eriti raske juhtumi korral (stsenaarium B) võnkesummuti-P rakendumisel

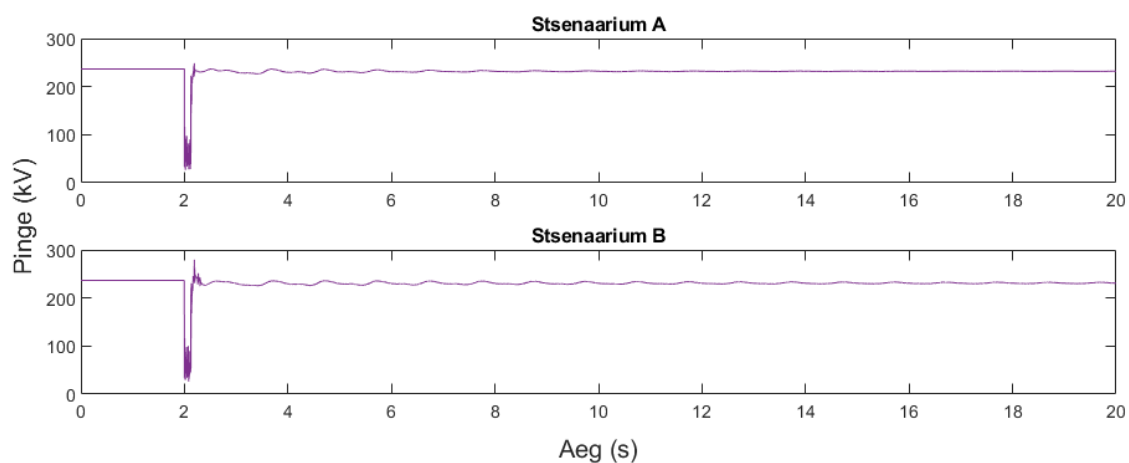
Stsenaarium B puhul on näha, et võnkesummuti pendeldas maksimaalse ja minimaalse väärtuse vahel kümnekond korda, enne kui selle mõju stabiilsusele ilmnes. Joonis 2.15 näitab kui suures ulatuses konkreetne võnkesummuti rakendus.

2.4.2 Võnkesummuti-Q mõju

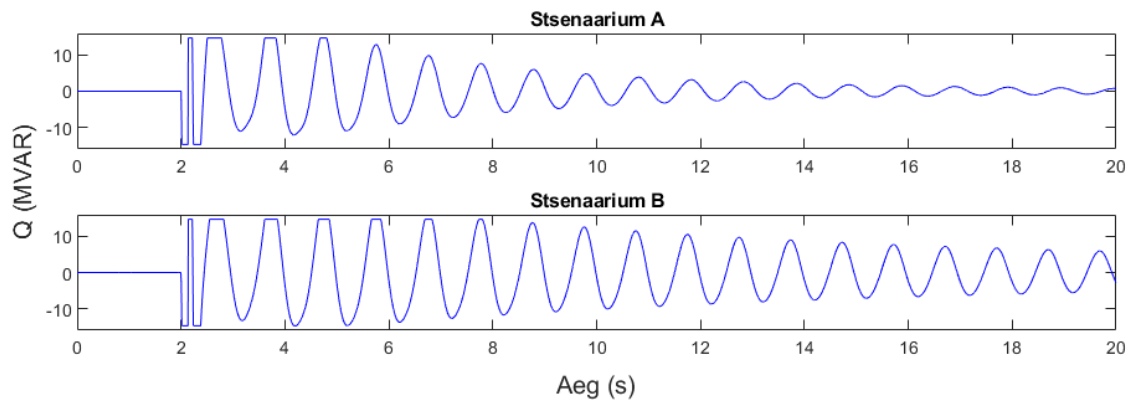
Sarnaselt võnkesummuti-P võnkesummuti mõjule joonis 2.17, joonis 2.18, joonis 2.19 ja joonis 2.20 näitavad võnkesummuti-Q summuti efektiivsust.



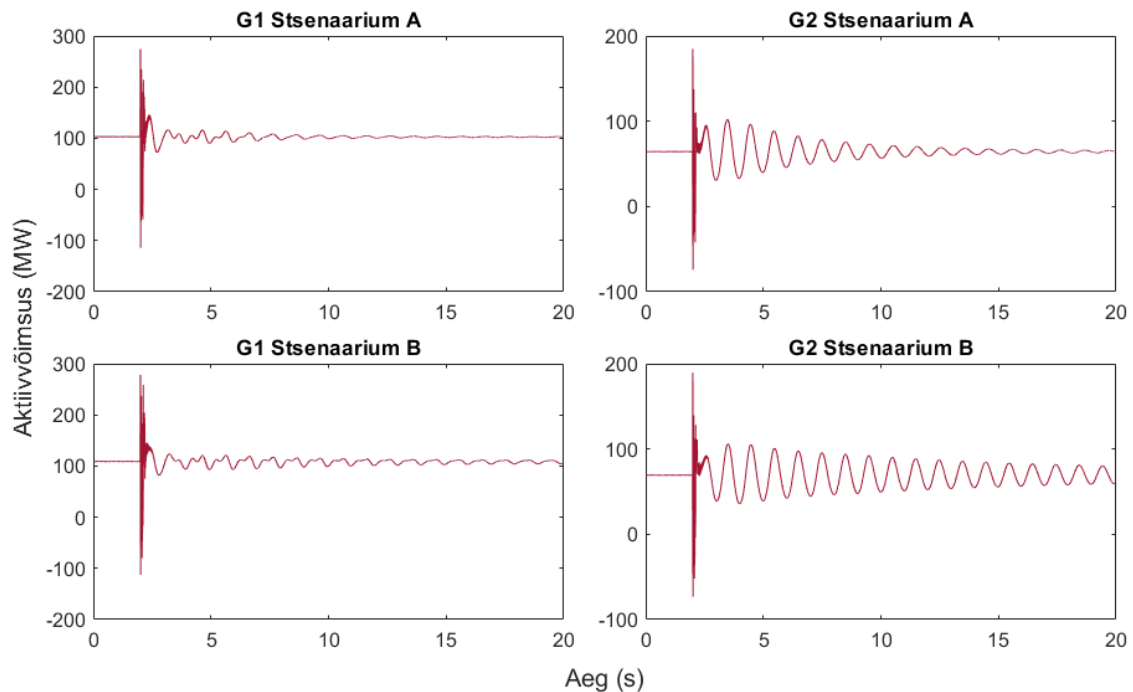
Joonis 2.17. Võrgusagedus võnkesummutiga-Q päikesepargi liitumispunktis raske juhtumi (stsenaarium A) ja eriti raske juhtumi korral (stsenaarium B)



Joonis 2.18. Pinge võnkesummutiga-Q päikesepargi liitumispunktis raske juhtumi (stsenaarium A) ja eriti raske juhtumi korral (stsenaarium B)



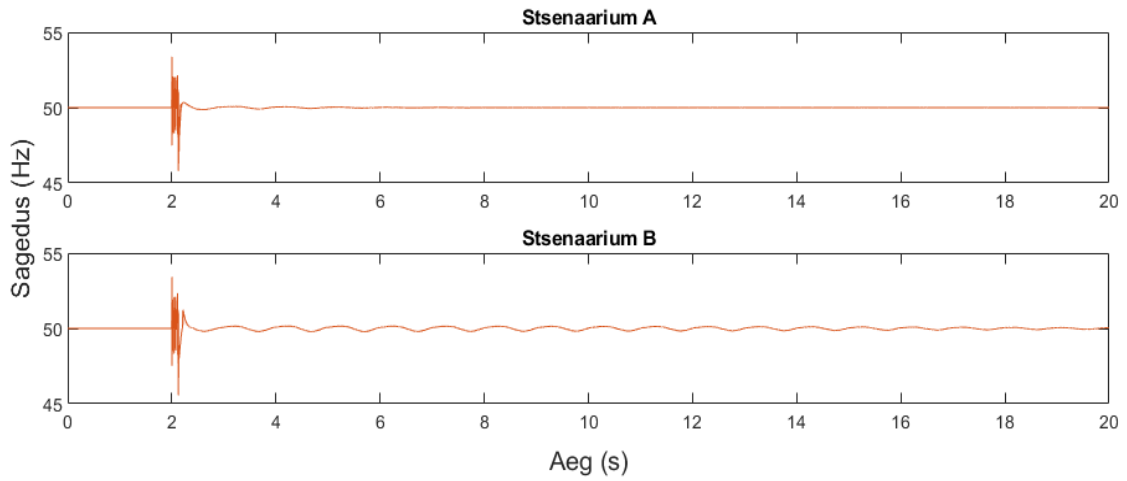
Joonis 2.19. Võnkesummuti-Q rakendumine raske juhtumi (stsenarium A) ja eriti raske juhtumi korral (stsenarium B)



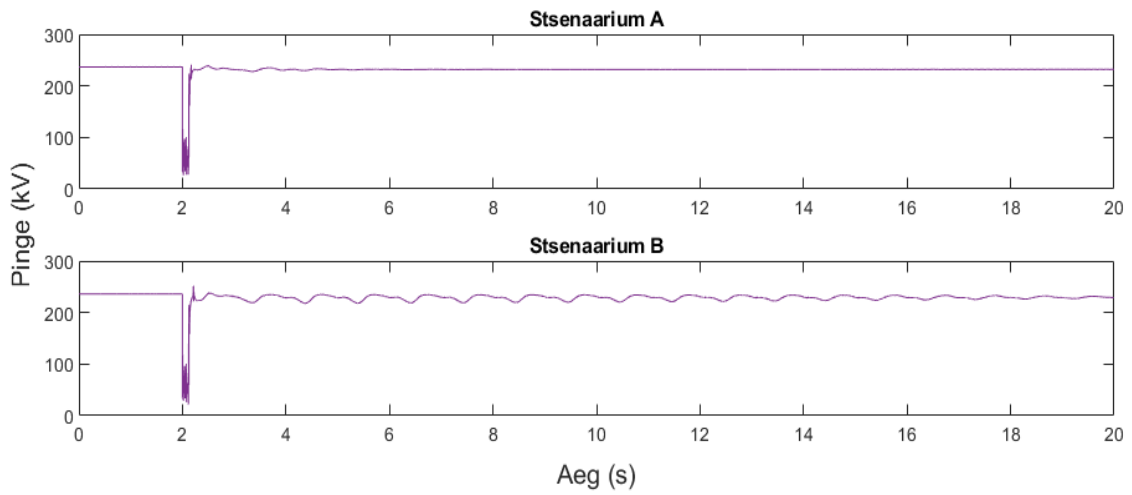
Joonis 2.20. Sünkroongeneraatorite (G1 ja G2) aktiivvõimsused raske juhtumi (stsenarium A) ja eriti raske juhtumi korral (stsenarium B) võnkesummuti-Q rakendumisel

2.4.3 Võnkesummuti-PQ mõju

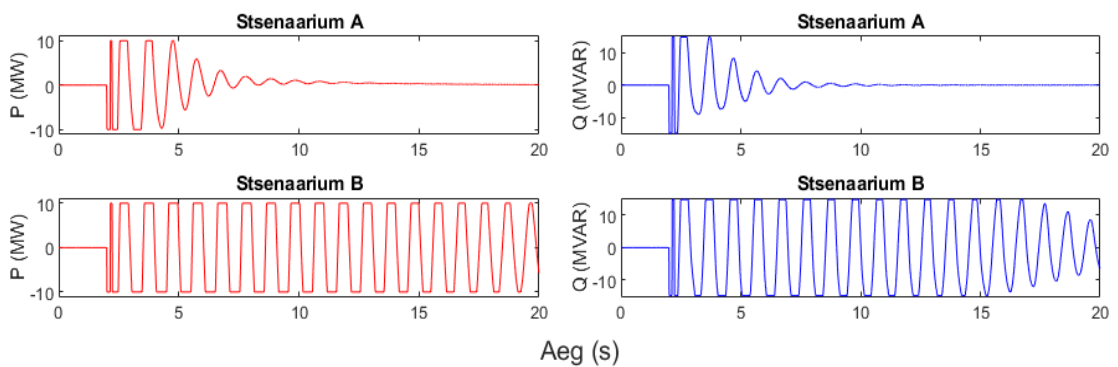
Sarnaselt võnkesummuti-P ja võnkesummuti-Q individuaalsele toimimisele, uuritakse ka võnkesummutite koosmõju ehk võnkesummuti-PQ funktsionaalsust, mis on näidatud järgnevatel joonistel.



Joonis 2.21. Võrgusagedus võnkesummutiga-PQ päikesepargi liitumispunktis raske juhtumi (stsenaarium A) ja eriti raske juhtumi korral (stsenaarium B)

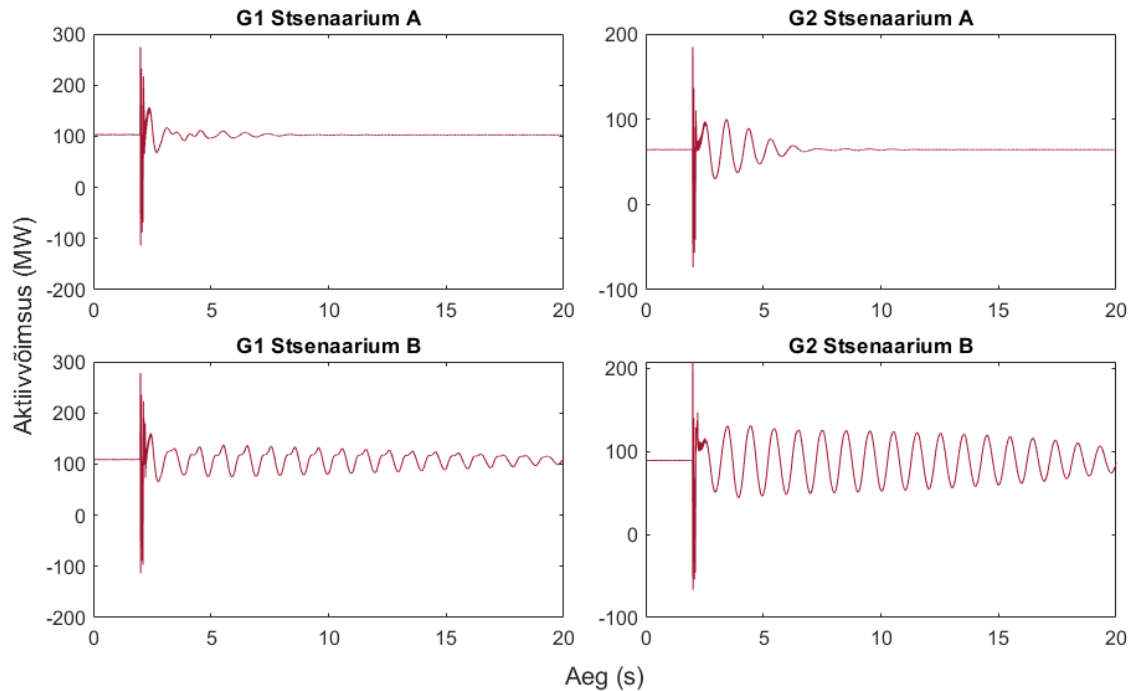


Joonis 2.22. Pinge võnkesummutiga-PQ päikesepargi liitumispunktis raske juhtumi (stsenaarium A) ja eriti raske juhtumi korral (stsenaarium B)



Joonis 2.23. Võnkesummuti-PQ rakendumine raske juhtumi (stsenaarium A) ja eriti raske juhtumi korral (stsenaarium B)

Võnkesummuti-PQ joonised viitavad väga huvitavale aspektile, kus esimesel juhul (stsenaarium A) on võnkesummutus äärmiselt efektiivne, aga teisel juhul (stsenaarium B) on võnkesummutuse mõju puudulik. Siit võib järeldada, et kui mõnedel tingimustel võnkesummuti-PQ koosmõju võib stabiilse olukorra saavutamist oluliselt kiirendada, kuid mõnedel teistel operatiivtingimustel võivad aga võnkesummuti-P ja võnkesummuti-Q summutit üksteisele vastu töötama hakata. Seda nähtust ilmestavad eriti hästi sünkroongeneraatorid (joonis 2.24), mille võimsusprofiilidest on näha, et võnkesummutite erinevate faasinurkade tõttu pole võnkumine enam siinuslainekujuline.



Joonis 2.24. Sünkroongeneraatorite (G1 ja G2) aktiivvõimsused raske juhtumi (stsenaarium A) ja eriti raske juhtumi korral (stsenaarium B) võnkesummuti-PQ rakendumisel

3 VÕNKESUMMUTITE RAKENDAMINE ANDMESIDE AEGVIITEGA JUHTSÜSTEEMIS

Kolmandas peatükis antakse metoodiline kirjeldus aegviitega süsteemi analüüsile, mis sisaldavad kolme aegviite kompenseerimismeetodit, ning loetletakse kõik uuringu stsenaariumid erinevate aegviidete, operatiivparameetrite, võnkesummutite juhtahelate ja kompenseerimismeetoditega. Selles peatükis esitatakse samuti juhtumuringu simulatsioonide tulemused ning analüüsitakse põhjalikult erievate meetodite efektiivsust.

3.1 Andmeside aegviite kompenseerimine

Selles jaotises kirjeldatakse põhjalikult, kuidas valitud aegviite kompenseerimismeetodeid võnkesummutite juhtahelates aegviitest tuleneva kahjuliku mõju likvideerimiseks rakendatakse.

3.1.1 Kompenseerimine mudelist sõltumatul meetodil

Andmeside aegviite kompenseerimiseks võnkesummutites on kirjanduses välja toodud mitmesuguseid meetodeid, kuid mõnel juhul ei nõua see keeruliste juhtloogikate rakendamist, vaid piisab ainult lihtsatest muudatustest võnkesummuti juhtahelas. Mitmetel juhtudel on võimalik süsteemi dünaamiline stabiilsus tagada, kui muuta võimendustegurit võnkesummuti tagasisideahelas [42]. Meetod põhineb ideel, et süsteemi stabiilsus muutub siis, kui mõni süsteemi karakteristilise võrrandi poolus läbib komplekstasandi imaginaartelje, kus ebastabiilne piirkond on parem pooltasand. Süsteem muutub stabiilseks, kui kõik poolused liiguvad vasakusse pooltasandisse (ehk reaalarvuline osa ei ole positiivne) [42]. Vastavalt artiklile [42] teatud aegviidete puhul piisab ainult võnkesummuti võimendusteguri muutmisest.

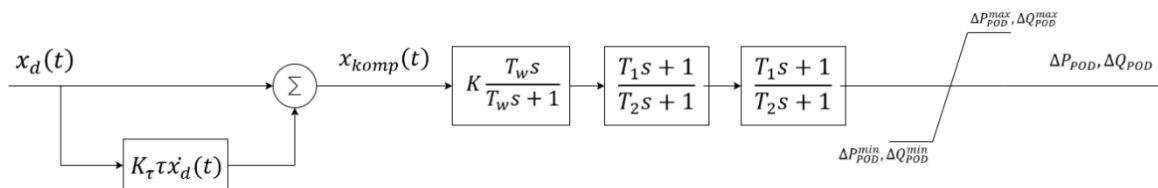
Konkreetses magistritöös leitakse optimaalne võnkesummutus võimendusteguri kordaja muutmise teel eksperimentaalselt. Aegviidet elektrijaama juhtseadme ja võrguinverterite vahel muudetakse samm sammult ja leitakse võimalikult stabiilne seisund. Teatud aegviidete vahemikus aga selline meetod ei toimi, s.t. stabiilset seisundit ei saavutata. Sellel juhul leitakse kõige kõrgemat efektiivsust võimaldav võimendustegur, millele lisaks liidetakse järgnevalt kirjeldatava tuletise juhtahel.

Aegviitega süsteemi stabiliseerimiseks on üks teine lihtsamaid valikuid muuta viitega signaal võimalikult viiteta signaali sarnaseks. See kompenseerimistehnika põhineb

aegviitega signaali esimesel tuletisel [26]. Kompenseeritud signaal x_{komp} , mis jäljendab algset aegviitega signaali x_d esitatakse järgnevalt:

$$x_{komp}(t) = x_d(t) + K_\tau \tau \dot{x}_d(t) \quad (3.1)$$

kus K_τ on tuletisega kompenseeritud signaali kordaja, τ aegviite pikkus ja \dot{x}_d on viitega signaali tuletis [26]. Selle meetodi rakendamiseks RSCAD mudelis kasutatakse [26] kirjeldatud mudelit, mida illustreerib joonis 3.1.



Joonis 3.1. Mudelist sõltumatul meetodil kompenseeritud sisendsignaali võnkesummuti-P ja võnkesummuti-Q juhtahel

3.1.2 Kompenseerimine libiseva pinna meetodil

Libiseva režiimi juhtimine (SMC) või libiseva pinna meetod on juba kauaaegselt automaatjuhtimises kasutatav mittelineaarne juhtimistehnika, mida iseloomustavad täpsus, robustsus ning lihtsa häälestuse ja rakendatavuse omadused [43] [44]. Libiseva režiimi juhtimisel on kaks peamist eelist, millest esimene võimaldab süsteemi dünaamilist käitumist kujundada vastavalt valitud libiseva funktsiooni omadustele ja teiseks muutub suletud juhtahelaga väljund teatud ebamäärasuste suhtes täielikult tundetuks [43]. Praktilisest vaatepunktist võimaldab libiseva pinna meetod juhtida mittelinearseid protsesse, mis alluvad välistele häiringutele ja suurtele mudeli määramatustele [43].

Esimest järku libiseva režiimi juhtimine põhineb seaduspärasusel:

$$u_{SMC} = -U_{SMC} \operatorname{sgn}(c\dot{e} + e) \quad (3.2)$$

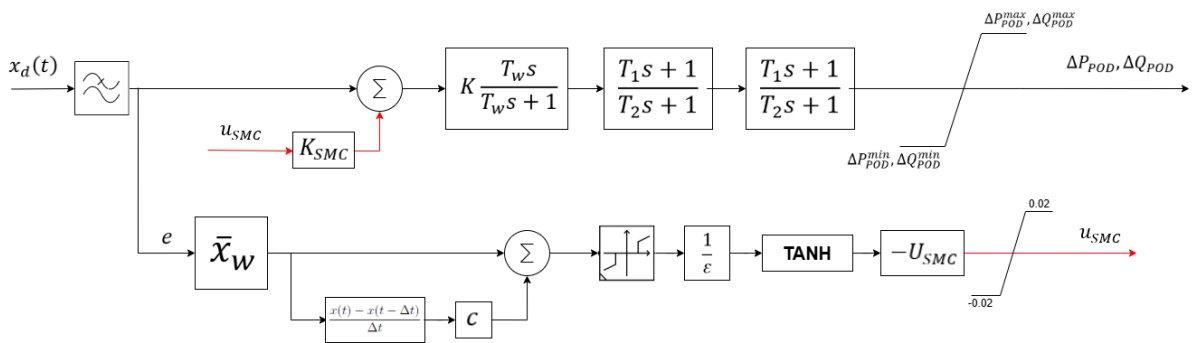
$$u_{SMC} = \begin{cases} -U_{SMC}, & c\dot{e} + e > 0 \\ U_{SMC}, & c\dot{e} + e < 0 \end{cases}$$

kus e ja \dot{e} on vastavalt hälve referentsväärtusest, mis selle töös on sageduse hälve, ja selle tuletis. Konstant c on positiivne kordaja ning u_{SMC} on juhtloogika väljundsignaal ja U_{SMC} on piisavalt suur positiivne konstant [43]. Kirjeldatud lahendus on üldjuhul efektiivne, kuid võib jällegi tekitada lisanduvaid võnkumisi. Seega „chattering“ nähtuse lahendamiseks kasutatakse katkendlikku märgist sõltuvat funktsiooni, mis on saadud pideva sujuva lähendusega. Nimetatu on kirjeldatud järgnevalt hüperboolse tangesi funktsiooni alusel [43]:

$$u_{SMC} = -U_{SMC} \tanh \left[\frac{(c\dot{e} + e)}{\varepsilon} \right] \quad (3.3)$$

$$\varepsilon > 0 \quad \varepsilon \approx 0$$

Konstant c väärtus leitakse eksperimentaalselt. Hüperboolse tangens-funktsiooni ette lisatakse tundetustsoon, mis on enamasti 0,5 – 2,5% maksimaalsest võimalikust hälbest, et juhtahel ei oleks ülitundlik äärmiselt väikestele sageduse hälvetele. Samuti meetodi stabiilsuse tagamiseks lisatakse sageduse hälbesignaali taha liikuva keskmise (*moving average*) funktsioon, mille akna suuruseks valitakse ligikaudselt aegviite suuruse ja simulatsiooni ajasammu ($50 \mu s$) jagatis. Signaal u_{SMC} (joonis 3.2) liidetakse võnkesummuti juhtahelale pärast madalpääsfiltrit ning enne teisi filtreid ja konstante. Võimenduskonstant K_{SMC} määrab libiseva pinna juhtahela märgi ja tugevuse võnkesummuti juhtahelas.



Joonis 3.2. Libiseva režiimi (SMC) meetodi kompenseeriv signaal u_{SMC}

3.1.3 Kompenseerimine Smith'i meetodil

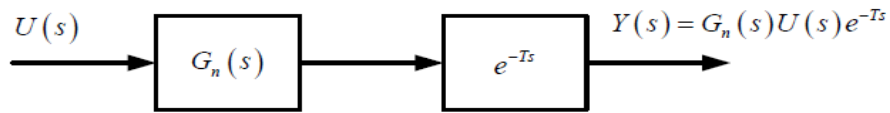
Kui optimaalselt häälestatud süsteemi tekib aegviide, tuleks stabiilsuse säilitamiseks võimendustegurit muuta. Smith'i ennustamisalgoritm võimaldab aga vältida võimenduse vähenemist ja sellest tulenevat kehvat jõudlust [45].

Smithi ennustaja struktuur

Süsteemi käitumist juhtsüsteemi ahelas kirjeldab juhtimisobjekt (*plant*) G_n , mida käsitletakse protsessi kirjeldava ülekandefunktsioonina. Juhtobjekti sisendsignaali saab tähistada Laplace'i kujul $U(s)$ ja väljundsignaali sümboliga $Y(s)$ [34]. Kirjeldades aegviidet kujul kui $e^{-\tau s}$, siis hilinenud (aegviitega) signaali saab lahti kirjutada kui:

$$G(s) = G_n(s)e^{-\tau s} = G_n(s) \frac{1 - \tau s/2}{1 + \tau s/2} \quad (3.4)$$

Seega hilinenud väljundsignaal on sel juhul $Y(s) = G_n(s)U(s)e^{-\tau s}$ (joonis 3.3) [34].

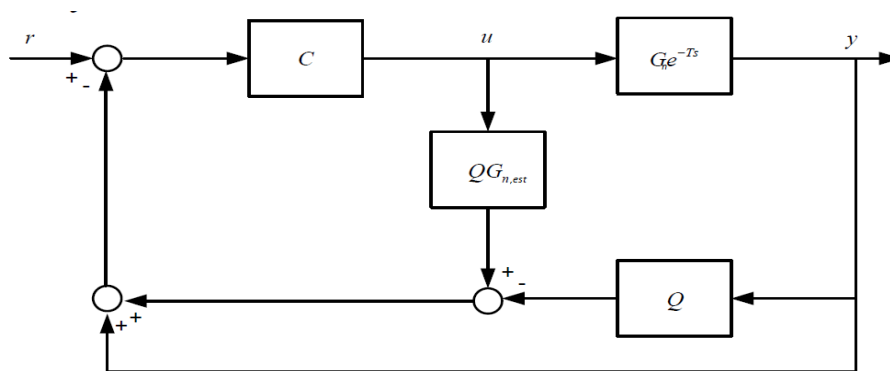


Joonis 3.3. Aegviitega $e^{-\tau s}$ süsteemi illustratsioon blokskeemi kujul [34]

Rakendades Smith'i ennustaja meetodit, tuleb leida ka hinnanguline juhtimisobjekt või protsessi ülekandefunktsioon $G_{n,est}$. Tähistades kontrolleri sümboliga C ja madalpääsufiltri sümboliga Q , siis võib Smith'i ennustaja suletud juhtahelad lahti kirjutada valemiga [45]:

$$\frac{U(s)}{R(s)} = \frac{CG_n e^{-\tau s}}{1 + QCG_{n,est} - QCG_{n,est}e^{-\tau s} + CG_n e^{-\tau s}} \quad (3.5)$$

kus $R(s)$ viitab referentsväärtusele. Joonis 3.4 illustreerib töös kasutatavat üldist Smith'i ennustaja struktuuri.



Joonis 3.4. Smith'i ennustaja meetodi struktuur [34]

Ülekandefunktsiooni määramine

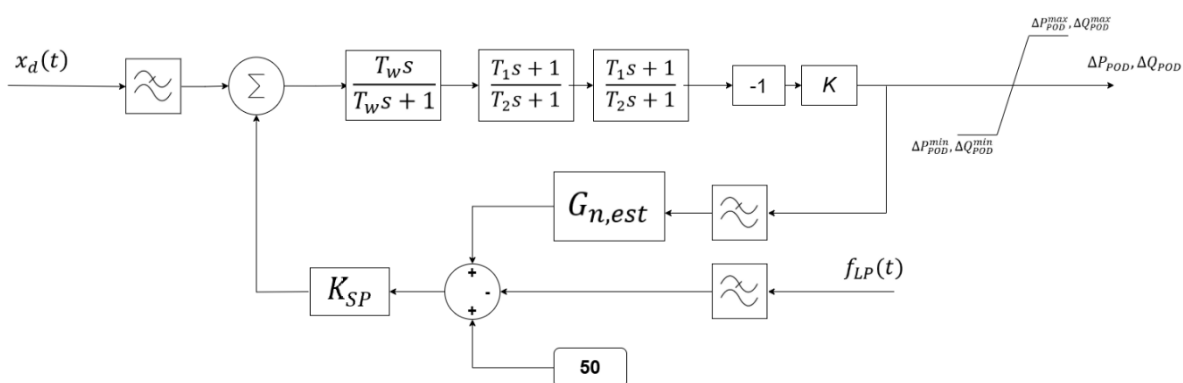
Smith'i ennustaja ülekandefunktsioon $G_{n,est}$ leiti Matlabi ülekandefunktsiooni estimeerija abil, kus pooluste ja nullide arv määrati eksperimentaalselt selliselt, et funktsiooni väljund oleks kõige lähemalt tegelikule signaalile. Aegviiteta tulemused simuleeriti stsenaarium A operatiivparameetrite näitel ja andmetena salvestati sagedus päikeseelektrijaama liitumispunktis ja võnkesummutite võimsussignaalid rikke korral. Seega juhtimisobjekti sisendiks oleks võnkesummuti võimsussignaal ja väljundiks sagedus liitumispunktis. Selliselt leiti, et häiringu tekkimisel kõige sobivam ülekandefunktsioon Smith'i ennustaja jaoks oleks:

$$G_{n,est} = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{0.0163s + 2.413^{-4}}{s^5 + 1.8s^4 + 24.22s^3 + 19.44s^2 + 2s + 6.326^{-5}} \quad (3.6)$$

Matlabi abil leitud ülekandefunktsiooni parameetreid kohandati selliselt, et see oleks mudeli jaoks sobivaim.

Modifitseeritud struktuur

Selles töös kasutati aegviite kompenseerimiseks võnkesummutite ahelas modifitseeritud struktuuri (joonis 3.5). Nimelt sisend Smith'i ennustaja jaoks võeti võnkesummuti väljundist enne võnkesummuti signaali piirajat, et Smith'i ennustajal oleks võimalik paremini süsteemi dünaamikat jälgida. Samuti võnkesummuti juhtahelale lisatav Smith'i signaal korrutatakse vastavalt aegviite suurusele kindla võimenduskordajaga K_{SP} .



Joonis 3.5. Smith'i ennustaja skeem võnkesummuti juhtahelas

Smith'i ennustaja ahelale liidetakse juurde ka referentsväärtus 50 Hz, kuna ennustaja signaal ehk ülekandefunktsiooni väljund oleks sageduse signalist (f_{LP}) selle võrra nihkes. See vajadus tekib, kuna võnkesummuti väljundsignaal on parajasti null, kui võnkesummutus ei ole vajalik ehk süsteemis puudub võnkumine, kuid sageduse mõõteväärtus on alati 50 Hz ringis. Klassikaliselt on ülekandefunktsiooni väljund null, kui selle sisend on samuti null.

3.2 Juhtumuringu stsenaariumide kirjeldus

Nagu varasemalt mainitud on vastavalt Eleringi dokumendile [23] inertsita tootmismoodulite suurim lubatud aegviide 0,5 sekundit. Aegviite pikkus ühe simulatsiooni vältel on defineeritud konstantsena ning selle väärtus on teada. Seega selles töös ei uurita niivõrd adaptiivseid andmeside aegviite kompenseerimismeetodeid, vaid on eeldatud, et aegviite pikkus süsteemis on mõõdetav ja suuresti mittevareeruva suurusega. Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse juhtahelates modelleeritavad aegviite blokid on lisatud elektrijaama juhtsüsteemide (k.a. võnkesummutid) ja võrguinverterite vahele (joonis 2.5).

Lõputöö tulemustena esitatakse ja analüüsitakse mitmeid aegviitega juhtumuringute stsenaariume nii kompenseerimata kui ka kompenseeritud võnkesummutitega, mida näitab tabel 3.1. Stsenaariumid A ja B on varasemalt kirjeldatud operatiivparameetritest

sõltuvad stsenaariumid, mille parameetrid on antud alajaotises 2.2.1. Stsenaariumite esimesed numbrid viitavad kas baasjuhtumile, kus andmeside aegviite kompenseerimismeetod puudub või rakendatakse vastavalt mudelist sõltumatut, libiseva pinna või Smith'i meetodit. Teised numbrid eristavad stsenaariume erinevate aegviidete ja võnkesummutitega, milleks on aktiivvõimsuse (summuti-P), reaktiivvõimsuse (summuti-Q) ning aktiiv- ja reaktiivvõimsuse (summuti-PQ) baasil töötav võnkesummuti.

Tabel 3.1. Aegviitega juhtumuuringu stsenaariumid

Stsenaarium	Kompenseerimis-meetod	Võnkesummuti	Aegviide	G1 & G2 operatiiv-parameetrid
0-1A	puudub	summuti-P	200 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
0-2A	puudub	summuti-P	350 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
0-3A	puudub	summuti-P	500 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
0-4A	puudub	summuti-Q	200 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
0-5A	puudub	summuti-Q	350 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
0-6A	puudub	summuti-Q	500 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
0-7A	puudub	summuti-PQ	200 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
0-8A	puudub	summuti-PQ	350 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
0-9A	puudub	summuti-PQ	500 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
0-10A	puudub	puudub	200 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
0-11A	puudub	puudub	350 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
0-12A	puudub	puudub	500 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
0-1B	puudub	summuti-P	200 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
0-2B	puudub	summuti-P	350 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
0-3B	puudub	summuti-P	500 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
0-4B	puudub	summuti-Q	200 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
0-5B	puudub	summuti-Q	350 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
0-6B	puudub	summuti-Q	500 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
0-7B	puudub	summuti-PQ	200 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
0-8B	puudub	summuti-PQ	350 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
0-9B	puudub	summuti-PQ	500 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
0-10B	puudub	puudub	200 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
0-11B	puudub	puudub	350 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
0-12B	puudub	puudub	500 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
1-1A	mudelist sõltumatu	summuti-P	200 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
1-2A	mudelist sõltumatu	summuti-P	350 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
1-3A	mudelist sõltumatu	summuti-P	500 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
1-4A	mudelist sõltumatu	summuti-Q	200 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
1-5A	mudelist sõltumatu	summuti-Q	350 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
1-6A	mudelist sõltumatu	summuti-Q	500 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
1-7A	mudelist sõltumatu	summuti-PQ	200 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
1-8A	mudelist sõltumatu	summuti-PQ	350 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
1-9A	mudelist sõltumatu	summuti-PQ	500 ms	0,52 & 0,65 s.ü.

Tabel 3.1 järg.

Stsenaarium	Kompenseerimis-meetod	Võnkesummuti	Aegviide	G1 & G2 operatiiv-parameetrid
1-1B	udelist sõltumatu	summuti-P	200 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
1-2B	udelist sõltumatu	summuti-P	350 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
1-3B	udelist sõltumatu	summuti-P	500 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
1-4B	udelist sõltumatu	summuti-Q	200 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
1-5B	udelist sõltumatu	summuti-Q	350 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
1-6B	udelist sõltumatu	summuti-Q	500 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
1-7B	udelist sõltumatu	summuti-PQ	200 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
1-8B	udelist sõltumatu	summuti-PQ	350 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
1-9B	udelist sõltumatu	summuti-PQ	500 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
2-1A	libiseva režiimi	summuti-P	200 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
2-2A	libiseva režiimi	summuti-P	350 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
2-3A	libiseva režiimi	summuti-P	500 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
2-4A	libiseva režiimi	summuti-Q	200 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
2-5A	libiseva režiimi	summuti-Q	350 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
2-6A	libiseva režiimi	summuti-Q	500 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
2-7A	libiseva režiimi	summuti-PQ	200 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
2-8A	libiseva režiimi	summuti-PQ	350 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
2-9A	libiseva režiimi	summuti-PQ	500 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
2-1B	libiseva režiimi	summuti-P	200 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
2-2B	libiseva režiimi	summuti-P	350 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
2-3B	libiseva režiimi	summuti-P	500 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
2-4B	libiseva režiimi	summuti-Q	200 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
2-5B	libiseva režiimi	summuti-Q	350 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
2-6B	libiseva režiimi	summuti-Q	500 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
2-7B	libiseva režiimi	summuti-PQ	200 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
2-8B	libiseva režiimi	summuti-PQ	350 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
2-9B	libiseva režiimi	summuti-PQ	500 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
3-1A	Smith'i	summuti-P	200 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
3-2A	Smith'i	summuti-P	350 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
3-3A	Smith'i	summuti-P	500 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
3-4A	Smith'i	summuti-Q	200 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
3-5A	Smith'i	summuti-Q	350 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
3-6A	Smith'i	summuti-Q	500 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
3-7A	Smith'i	summuti-PQ	200 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
3-8A	Smith'i	summuti-PQ	350 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
3-9A	Smith'i	summuti-PQ	500 ms	0,52 & 0,65 s.ü.
3-1B	Smith'i	summuti-P	200 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
3-2B	Smith'i	summuti-P	350 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
3-3B	Smith'i	summuti-P	500 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
3-4B	Smith'i	summuti-Q	200 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
3-5B	Smith'i	summuti-Q	350 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
3-6B	Smith'i	summuti-Q	500 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
3-7B	Smith'i	summuti-PQ	200 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
3-8B	Smith'i	summuti-PQ	350 ms	0,55 & 0,90 s.ü.
3-9B	Smith'i	summuti-PQ	500 ms	0,55 & 0,90 s.ü.

Lisaks võnkesummutite andmeside ajalisele viitele ei toimu ka võimsuste sättepunktide edastamine reaajas, vaid kindla intervalli tagant. Seega aegviite 200 ms korral saadetakse päikeseelektrijaama juhtseadmest võrguinverteritele sätteväärtusi 50 korda sekundis ehk iga 20 ms tagant. Aegviite 350 ms korral on diskreetimissagedus ligikaudu 43 korda sekundis ehk sätteväärtusi edastatakse 23 ms sekundi tagant ning 500 ms korral on see jällegi 50 korda sekundis ehk iga 20 ms sekundi tagant. Samuti alates aegviitest 200 ms stabiilse ja mitte liialt juhtsüsteemi tagamiseks asendatakse reaktiivvõimsuse sätteväärtuse juhtimisahelas PI-regulaatori integraatorlülil ajakonstant 5,33 sekundiga, mis oli varasemalt 3,33 sekundit.

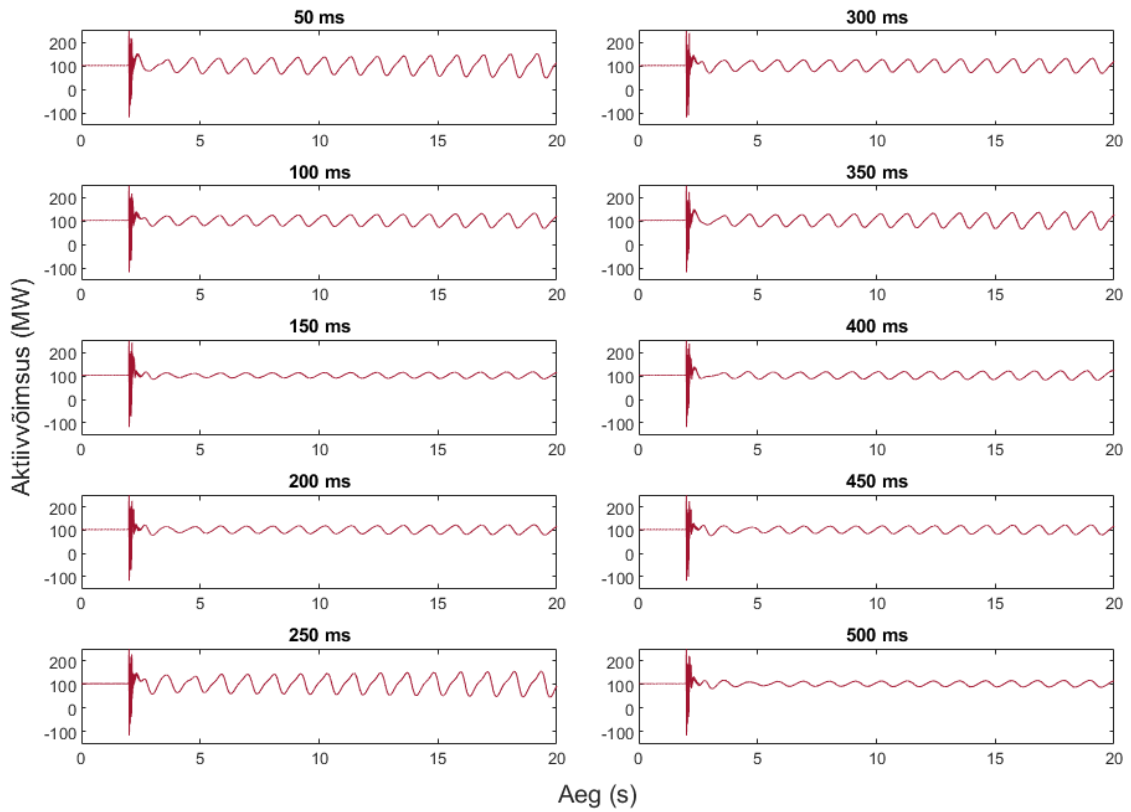
3.3 Aegviitega juhtsüsteemi rakendamise tulemused

Tulemuste jaotises analüüsitakse põhjalikult süsteemi käitumist, võnkesummutite mõju ja aegviite kompenseerimismeetodite efektiivsust. Alajaotises 3.3.1 uuritakse üksikasjalikult nii võnkesummutita süsteemi dünaamilist stabiilsust häiringu korral kui ka kõigi kolme võnkesummuti mõju erinevate aegviidete pikkuste juures. Alajaotistes 3.3.2, 3.3.2 ja 3.3.4 analüüsitakse erinevate aegviidete kompenseerimismeetodite tulemusi ja nüansse. Uurituid meetodeid võrreldakse alajaotises 3.3.5, kus ka antakse ülevaate järeldustest ning kontrollitakse tulemuste vastavust hüpoteesidele.

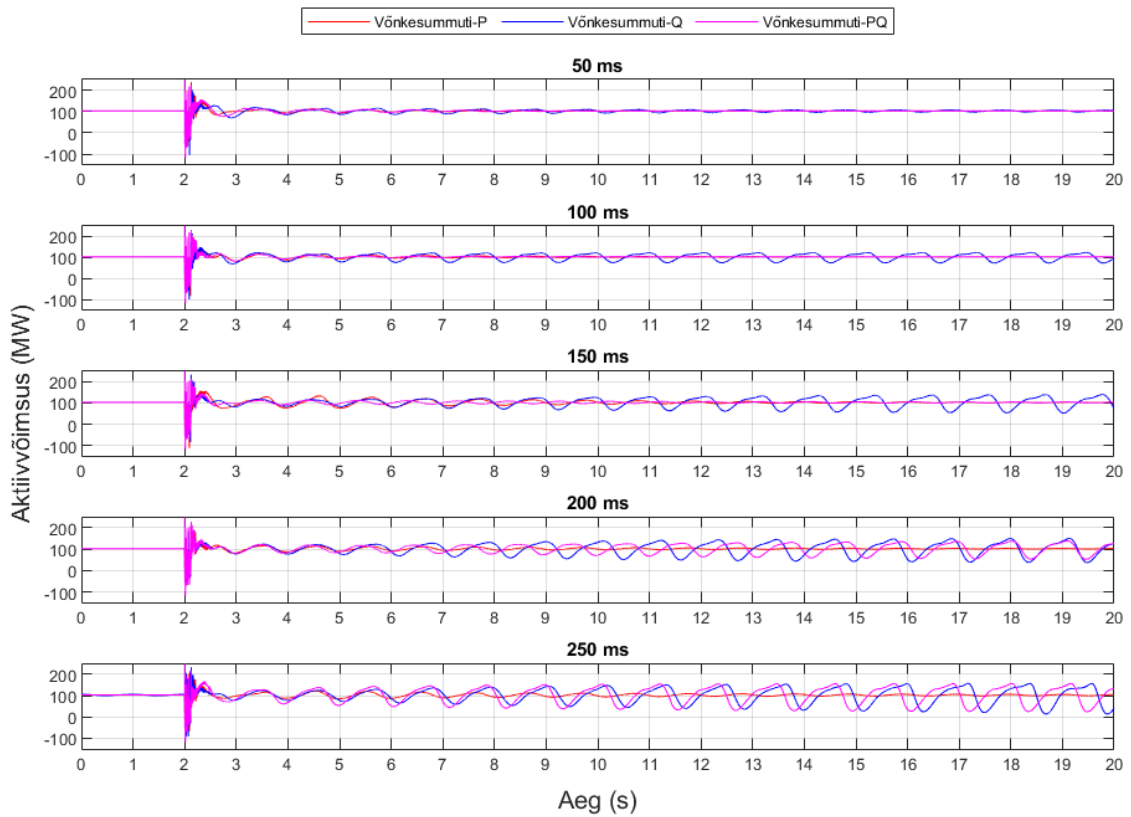
3.3.1 Kompenseerimata juhtsüsteem

Elektrisüsteemi nurgastabiilsus muutub oluliselt, kui suletud juhtsüsteemi sätte- ja mõõteväärtused hilinevad andmeside tehniliste piirangute tõttu. Selleks et näidata, kuidas võnkeprotsessid muutuvad andmeside aegviite suurenedes, joonis 3.6 illustreerib võnkeprotsessi arengut, kui aegviidet stsenaarium A korral suurendada iga 50 ms sekundi tagant. Joonis 3.7 ja joonis 3.8 näitavad aga võnkesummutite efekti.

Konkreetsetes näidetes analüüsitakse ainult stsenaariumiga A defineeritud operatiivparameetritega võnkumisi, sest stsenaarium B korral oleks aegviite suurendamine 50 ms järel vähem informatiivne. Sel juhul on süsteemi olek olulisemalt ebastabiilsem, mil võnkumiste amplituud suureneb väga järsult. Stsenaarium B tulemusi vaadeldakse põhjalikumalt hilisemates näidetes, kus aegviide on 200 ms, 350 ms ja 500 ms. Võnkeprotsesside võrdlemiseks valiti generaator 1 aktiivvõimsuses profiil, kuna see illustreerib kõige selgemini, kuidas päikeseelektrijaama juhtsüsteemide andmeedastuskiiruse varieerumine mõjutab elektrisüsteemi dünaamilist stabiilsust.



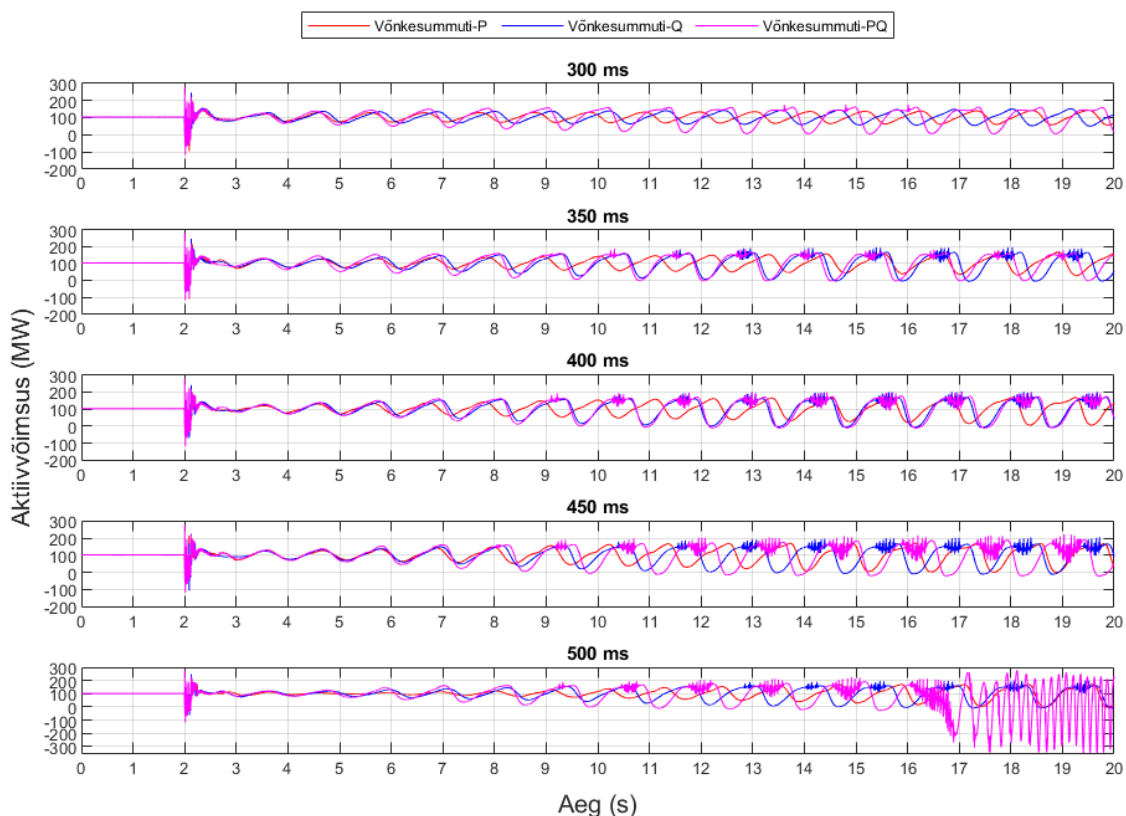
Joonis 3.6. Võnkesummutita süsteemi häiring stsenaariumi A ja erinevate andmeside aegviidete korral



Joonis 3.7. Võnkesummutusega süsteemi häiring erinevate andmeside aegviidete (50 – 250 ms) korral

Joonistelt ilmneb, et võnkesummuti puudumisel hakkab häiringu tekkimishetkel elektrisüsteem perioodiliselt ja mittesumbuvalt võnkuma. Vaatamata sellele võnkumiste amplituud ei kasva proportsionaalselt viite pikkuse suurenemisega. Kui aegviidete 50 ms, 250 ms ja 350 ms juhtudel on võnkumine tugevalt võimenduv, siis teistel juhtudel kasvab amplituud kas mõõdukalt või jääb süsteem püsiva amplituudiga võnkuma. Joonis 3.6 samuti viitab huvitavale iseärasusele, kust ilmneb, et erinevate aegviidete korral ei pruugi aga süsteemi võnkumised aga sarnaselt kasvada. See tähendab, et süsteem on äärmiselt tundlik igasuguste mitteideaalsetele teguritele päikeseelektrijaama juhtsüsteemis ja generaatorite vastastikmõjudele.

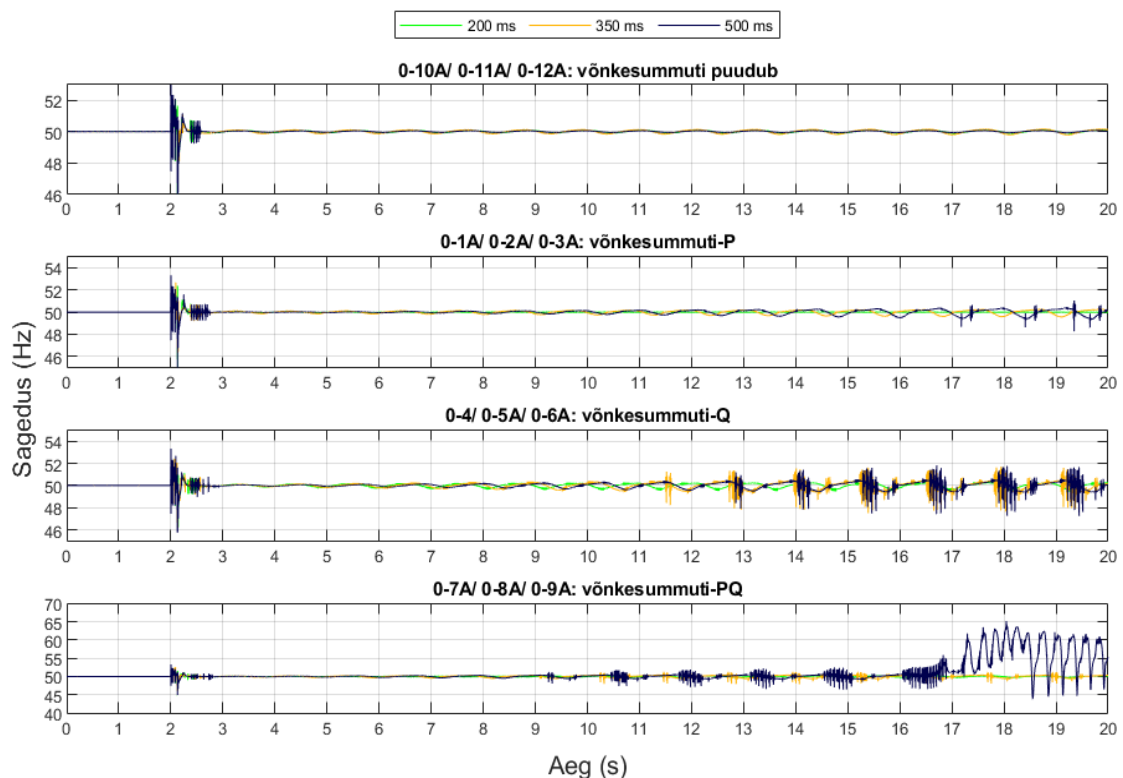
Kui joonis 3.6 ei viidanud sellele, et süsteemi võnkumiste amplituud ei kasva proportsionaalselt juhtsüsteemi aegviite pikkuse suurenemisega, siis joonis 3.7 ja joonis 3.8 näitavad aga, et võnkesummutite efektiivsus tõepoolest kahaneb aegviite pikkusega. Seda näitavad nii suurenev sageduse võnkumiste amplituud kui ka mööduvad kõrgesageduslikud võnkumised võrgusageduse maksimumvärtuse juures. Lisaks alates aegviitest 350 ms võnkesummutite toime pole mitte ainult ebaefektiivne, vaid lausa süsteemile kahjulik, mida näitavad eriti hästi stsenaariumid aegviidetega 450 ms ja 500 ms.



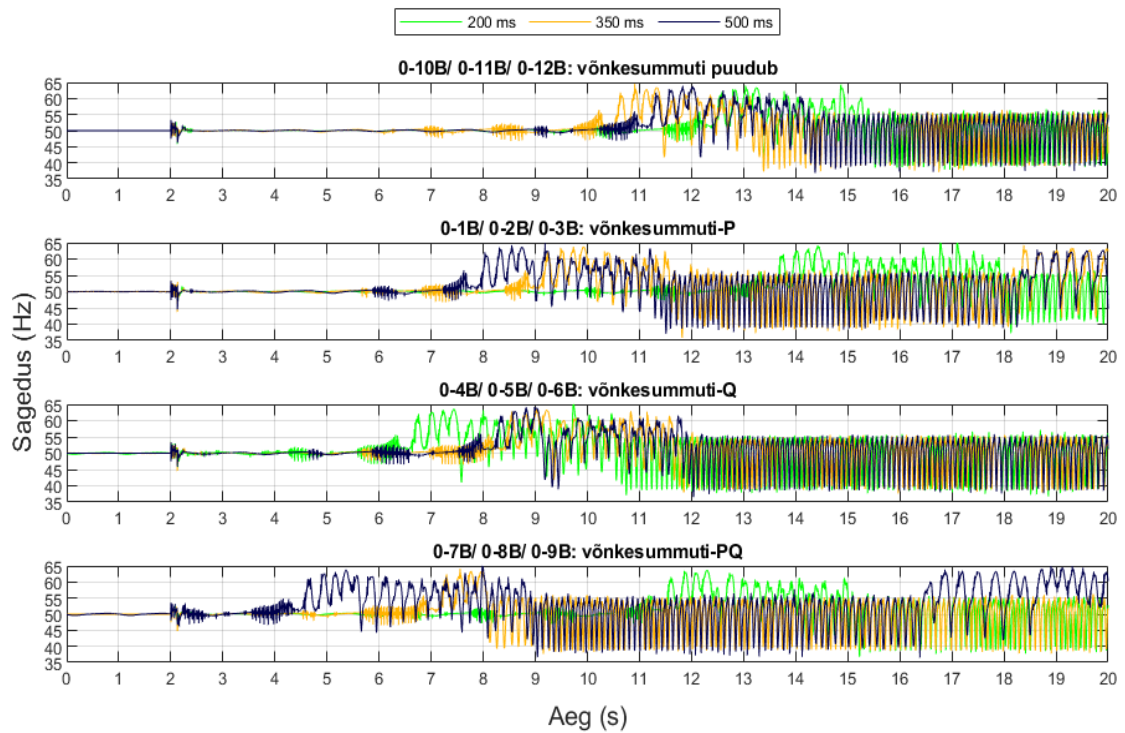
Joonis 3.8. Võnkesummutusega süsteemi häiring erinevate andmeside aegviidete (300 - 500 ms) korral

Selleks, et juhtsüsteemide aegviidete ja võnkesummutite mõju põhjalikumalt uurida, analüüsitakse järgnevalt stsenaariume aegviidetega 200, 350 ja 500 ms. Kuna võnkesummutite juhtahelate lähtepunktiks on sageduse hälve päikeseelektrijaama liitumispunktis, siis on mõistlikum tähelepanu pöörata sageduse muutumisele (joonis 3.9 ja joonis 3.10). Joonistelt on selgelt näha, et liitumispunkti sageduse võnkumine püsib esimesel 10-20 sekundil pärast häiringu teket 1 Hz vahemikus, kuid võnkumiste amplituudi kasvamisel lisanduvad kõrgsageduslikud komponendid. Siis küündib sageduse hälve nominaalväärtusest isegi 15 Hz-ni. Reaalsed elektrisüsteemid sellisel juhul ei oleks võimelised enam opereerima. Joonis 3.10 näitab, et elektrisüsteem kaotaks sünkroonsuse juba peale kaheksandat, kuuendat, neljandat või teist sekundit pärast häiringu teket. Eriti ilmne on see võnkesummutite kasutamisel ja pikemate aegviidete korral.

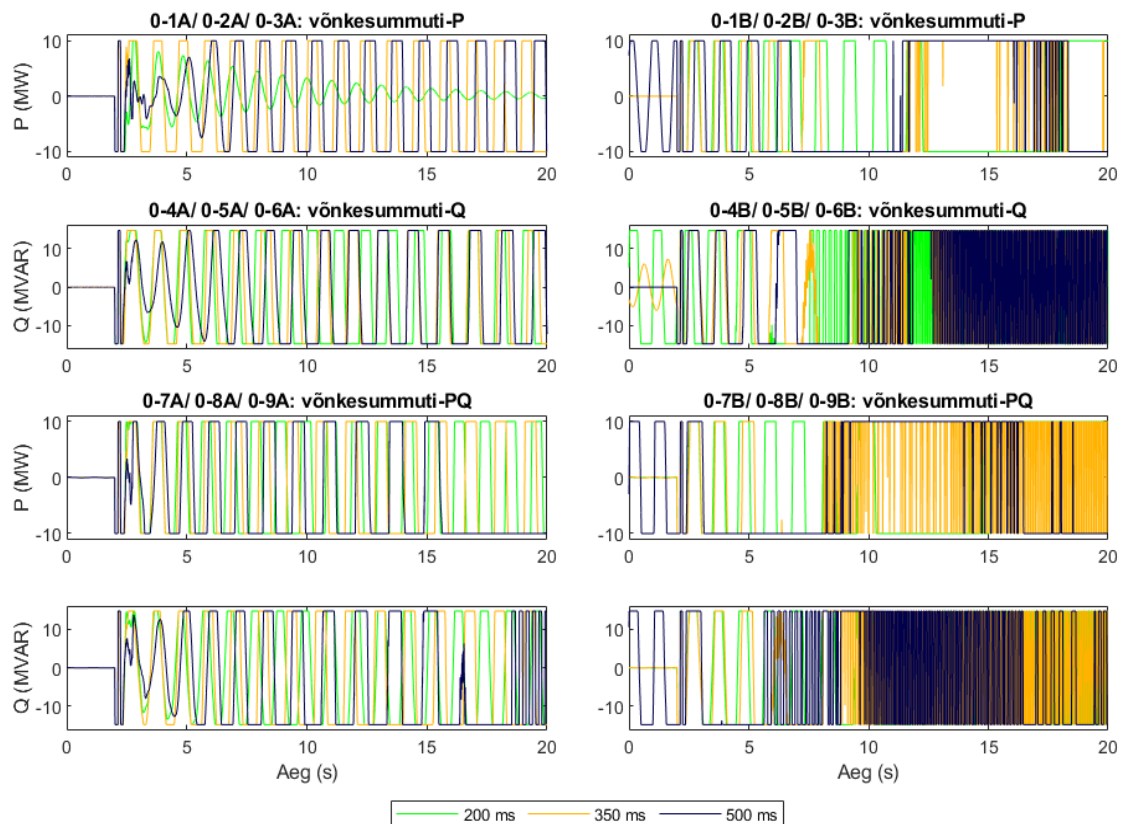
Joonis 3.11 näitab võnkesummutite käitumist eelnevalt kirjeldatud juhtudel. Joonis 3.12 ja joonis 3.13 aga näitavad sünkroongeneraatorite G1 ja G2 käitumist häiringu tekkel, mis kinnitavad eelnevaid järeldusi.



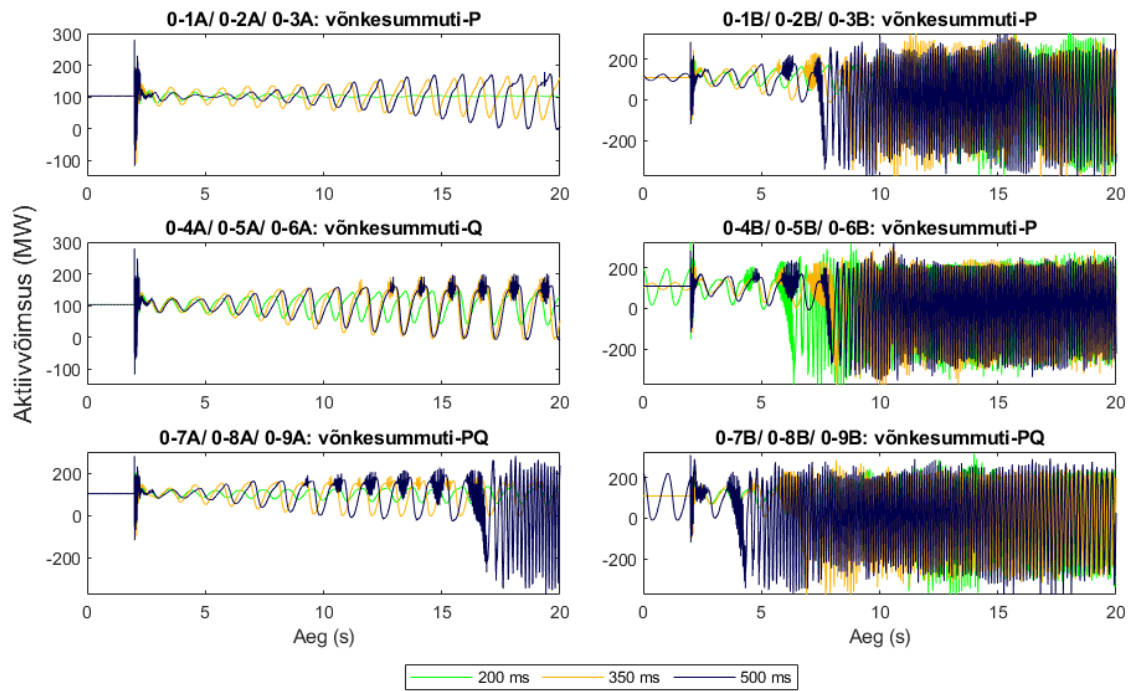
Joonis 3.9. Kompenseerimata võnkesummutusega süsteemi sagedus häiringu tekkel stsenaarium A ning aegviidete 200, 350 ja 500 ms korral



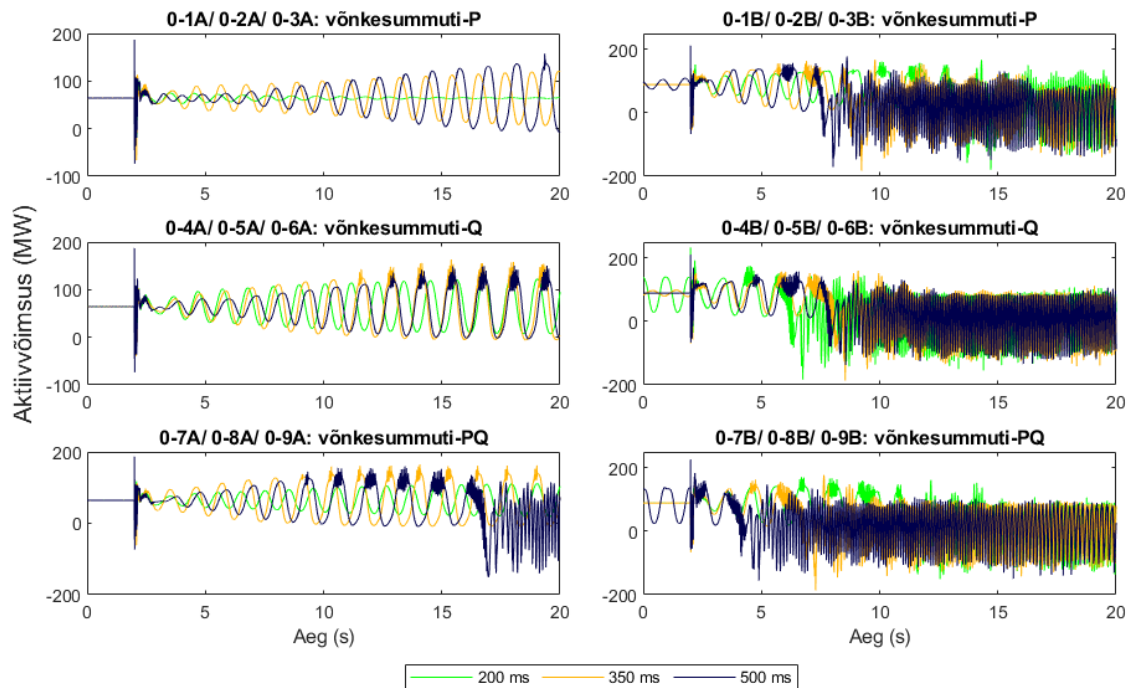
Joonis 3.10. Kompenseerimata vönkesummutusega süsteemi sagedus päikeselektrijaama liitumispunktis häiringu tekkel stsenaarium A ning aegviidete 200, 350 ja 500 ms korral



Joonis 3.11. Kompenseerimata vönkesummutite juhtahelate aktiiv- ja reaktiivvõimsuse profiilid häiringu tekkel stsenaariumide A ja B ning aegviidete 200, 350 ja 500 ms korral



Joonis 3.12. Kompenseerimata võnkesummutusega süsteemi sünkroongeneraatori 1 (G1) aktiivvõimsus häiringu tekkel aegviidete 200, 350 ja 500 ms korral



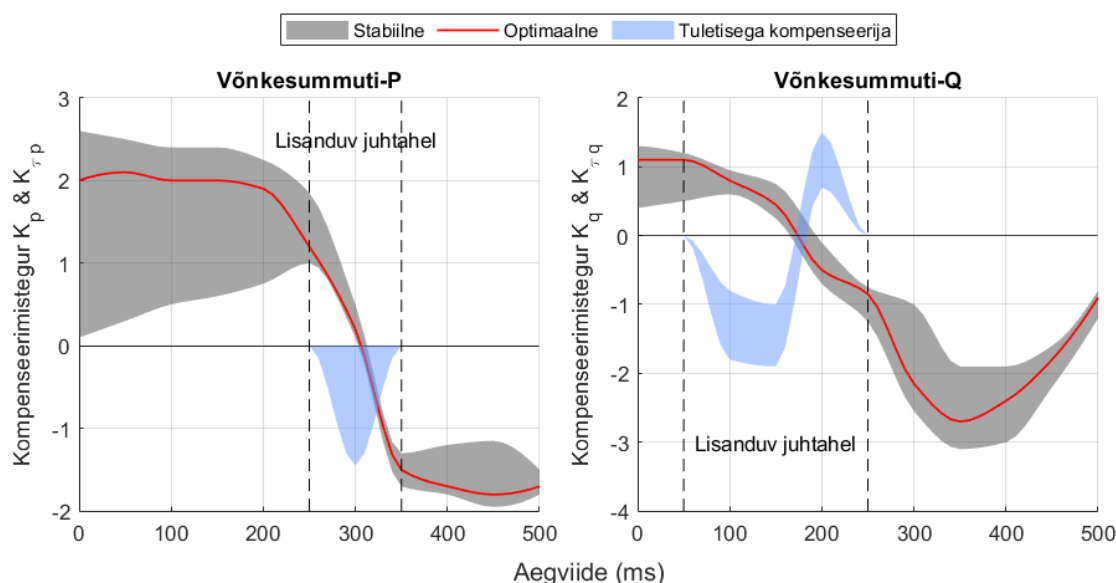
Joonis 3.13. Kompenseerimata võnkesummutusega süsteemi sünkroongeneraatori 2 (G2) aktiivvõimsus häiringu tekkel aegviidete 200, 350 ja 500 ms korral

Ilmselt ei saaks generaatorid töötamist jätkata, kui tekib niivõrd suure amplituudiga kõrgsageduslik võnkumine. Eriti probleemne on olukord, kui generaatorite aktiivvõimsus muutub negatiivseks, mis viitab katastroofilisele ebastabiilsusele. Kui stsenaariumide 0-1A, 0-2A ja 0-3A puhul ilmneb, et võnkesummutid ei ole piisavalt efektiivsed süsteemi

dünaamilist stabiilsust tagama, siis stsenaariumid 0-4A kuni 0-9A ja kõik B stsenaariumid näitavad, et võnkesummutid mõjuvad elektrisüsteemile kahjustavalt. Mõnikord võnkesummuti tõttu tekib võnkeprotsess juba enne häiringut suhteliselt stabiilses seisundis.

3.3.2 Mudelist sõltumatu meetodil kompenseeritud võnkesummutid

Eespool kirjeldatud mudelist sõltumatu andmeside aegviite kompenseerimismeetod, mis võimaldaks tagada võnkesummutite kasulikkuse ka pärast häiringu teket, sõltub tugevalt aegviite pikkusest. Selleks, et demonstreerida kompenseerimisvajaduste muutumist sõltuvalt viite pikkusest, joonisel 3.14 esitatakse võnkesummutite-P ja -Q kordajad K_p ja K_q , millega tuleks esialgsed viiteta võnkesummutite võimendustegurid läbi korrutada. $K_{\tau p}$ ja $K_{\tau q}$ viitavad aegviitega signaali esimese tuletisega juhtahelate kordajatele (defineeritud jaotises 3.1.3), mille eesmärk on efektiivselt võnkumised summutada stsenaariumide korral, kus võimendusteguri korrigeerimisest ei piisa. Seega teatud stsenaariumide puhul stabiilsuse saavutamiseks oleks vajalik kasutada nii võnkesummutite võimendusteguri kordajat kui ka tuletisega kompenseerivat juhtahelat. Joonis 3.14 illustreerib stsenaariumi A operatiivparameetritega juhtumeid, mille puhul aegviidet suurendatakse 50 ms sammuga. Stsenaarium B juhtumeid analüüsitakse aga ainult aegviidete 200, 350 ja 500 ms juures, kuna korrigeeritud võimendusteguritega simulatsioonid iga 50 ms tõusu ei annaks oluliselt suuremat väärtust, kuid tõstaks oluliselt töömahtu. Võib eeldada, et selle meetodiga kompenseeritud võnkesummutus on äärmiselt tundlik süsteemi koormatusele.



Joonis 3.14. Mudelist sõltumatu meetodil korrigeeritud võnkesummutite häiringuga süsteemi stabiilsusgraafik sõltuvalt andmeside aegviite pikkusest (stsenaarium A)

Tulemustest selgub, et nii võnkesummuti-P kui võnkesummuti-Q korral optimaalne võimendusteguri kordaja, mis annaks maksimaalse summutusefekti, muutub vastavalt andmeside viite pikkusele. Saavutades võnkesummutusevõimekuse piiri, on vajalik kasutada lisanduvat juhtahelat. Kui aga aegviide on veelgi suurem, siis võimendustegur nõuab negatiivset kordajat. Lisanduva juhtahela kordaja suurus ja märk samuti sõltub viite pikkusest. See kordaja aga omakorda sõltub võnkesummutite võimendusteguri kordaja suuruselt ja märgist. Mida nõrgem on võnkesummuti põhijuhtahela efekt, seda suurem peab olema lisanduva kompenseeriva juhtahela võimendus.

Kui võnkesummuti-P on kuni viiteni 250 ms on nurgastabiilsuse tagamisel üsnagi efektiivne varieeruvate võimendustegurite korral, siis võnkesummuti-Q on märksa tundlikum. See tähendab, et selle meetodi ja võnkesummuti-Q kasutamisel on äärmiselt oluline võimalikult täpselt teada päikeseelektrijaama juhtsüsteemide aegviidet. Samuti muutub võnkesummuti-Q võimendusteguri kordaja negatiivseks juba üsna väikese aegviite (ca 165 ms) korral, millele viitab ka varasem joonis 3.7, kus ka umbes sellise aegviite korral hakkab võnkeprotsess tugevalt suurenema.

Kasutades saadud optimaalseid võimendustegurite ja tuletise juhtahela kordajaid, on võimalik rakendada stabiilsuse tagamiseks ka võnkesummutit-PQ. Mõnel juhul on vajalik võimenduskordajate korrigeerimine sobivate kordajate vahemikus, kuna summutusefekt on liiga tugev, mis hakkab vastupidiselt võnkesummutite koostööd häirima. Sarnaselt stsenaariumile A leiti võnkesummutite kordajad stsenaarium B juhtude jaoks (tabel 3.2), kuid seda ainult aegviidete 200, 350 ja 500 ms korral.

Tabel 3.2. Mudelist sõltumatul meetodil korrigeeritud võnkesummutite võimendustegurite ja lisanduva tuletisel põhineva juhtahela kordajad sõltuvalt andmeside aegviite pikkusest (stsenaarium B)

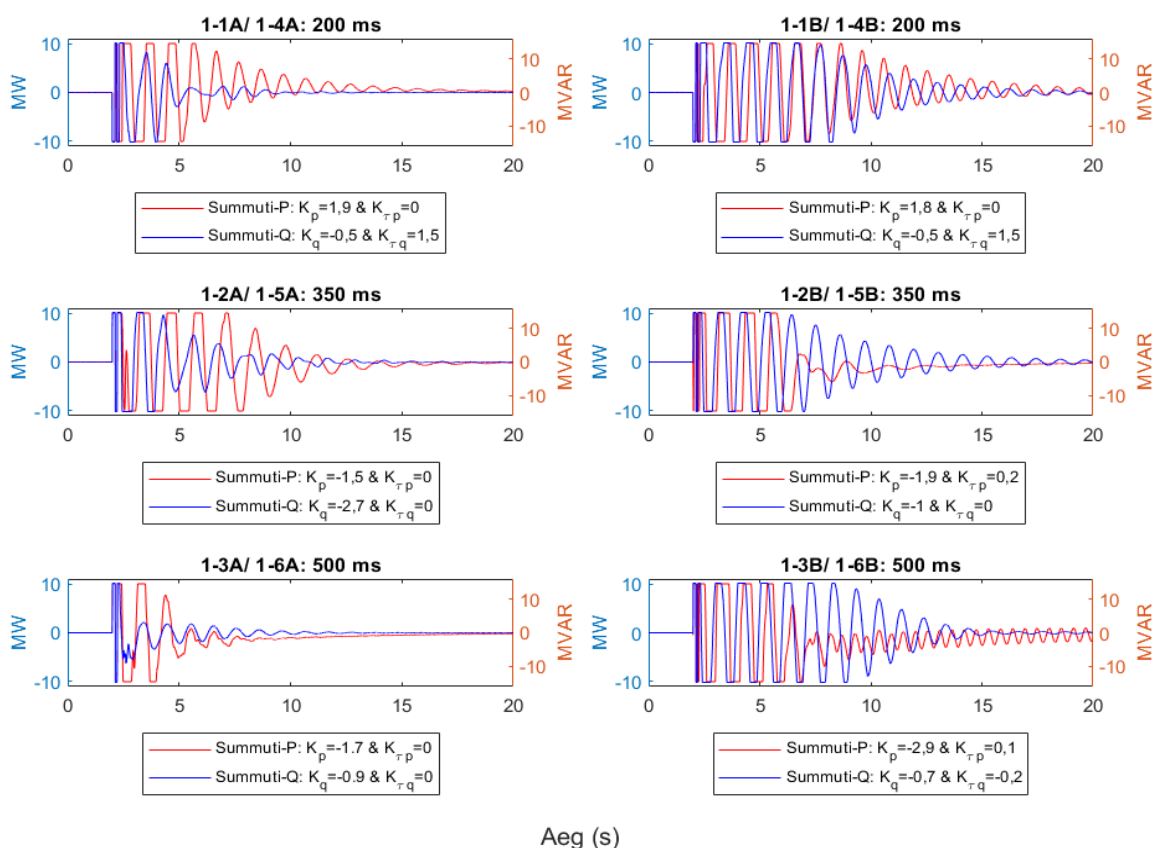
Aegviide	Võnkesummuti-P:		Võnkesummuti-Q:		Võnkesummuti-PQ:	
	K_p	$K_{\tau p}$	K_q	$K_{\tau q}$	$K_p; K_q$	$K_{\tau p}; K_{\tau q}$
200 ms	1,8	x	-0,5	1,5	1,8; -0,5	x ; 1,5
350 ms	-1,9	0,2	-1,0	x	-1,9; -1,0	0,2; x
500 ms	-2,9	0,1	-0,7	-0,2	-2,7; -0,7	0,1; -0,2

Sünkroongeneraatorite kõrgemate talitlusvõimsuste juures oli optimaalsete kordajate leidmine oluliselt keerulisem ning stabiilsed olekud esinesid veidi teistes punktides kui stsenaarium A juhtudel, v.a. aegviite 200 ms juures. Aegviite 500 ms korral oli vaja kasutada absoluutväärtuselt kõrgemat võnkesummuti-P võimendusteguri kordajat. Viidete 350-500 ms korral oli vaja lisada nõrga võimendusega ($K_{\tau p}$) lisanduv kompenseeriv juhtahel, mis aga ei olnud vajalik teiste stsenaariumide korral. Samuti võnkesummuti-Q ja viite 500 ms korral piisas varem ainult võimendusteguri kordaja

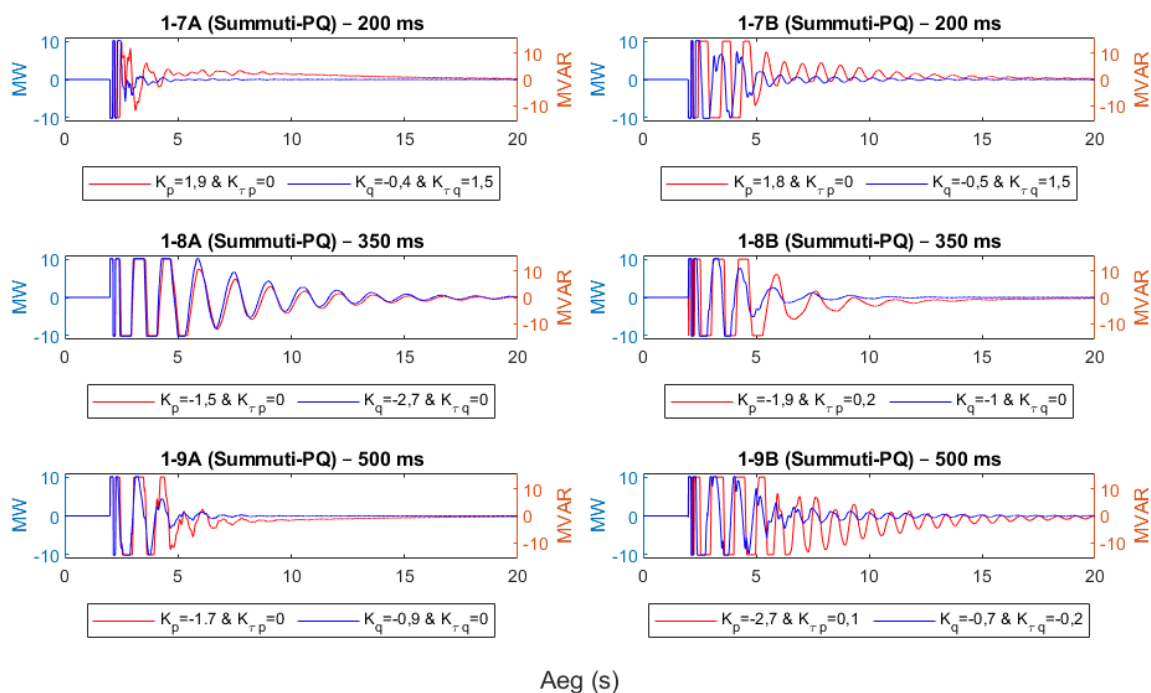
korrigeerimisest, kuid stsenaarium B ehk raskemates operatiivtingimustes tuli lisada kompenseeriv juhtahel.

Ühesõnaga selle meetodi rakendamisel on ülimalt oluline aru saada, kus punktides süsteemi ebastabiilsus tekib, mis omakorda sõltuvad väga mitmetest tingimustest. See reaalsuses tähendab, et päikeseelektrijaama võnkesummutite ja kompenseerimisahelate parameetrite valimisel on oluline teada süsteemi maksimaalseid võimsusi. Vastasel juhul võnkesummutus keerulistemas olukordades ei pruugi toimida.

Joonis 3.15 näitab kompenseeritud võnkesummuti-P ja võnkesummuti-Q rakendamisprofiile erinevate aegviidete ja stsenaariumide korral ning joonis 3.16 illustreerib võnkesummuti-PQ rakendumist samadel juhtudel. Stsenaarium A juhtudel töötavad kompenseeritud summutid pigem hästi ja eriti efektiivselt töötab summuti-PQ. Stsenaarium B ehk eriti rasketel juhtudel osutus optimaalse summutuse leidmine keerukaks. Nendel juhtudel oli eriti probleemne võnkesummuti-P kompenseerimine, kuna kas võimendusteguri kordaja K_p ei olnud piisav õigeaegselt võnkumiste summutamiseks või võnkumiste mõju suurendades tekkis ka kõrgesageduslik perioodilise võnkumise komponent. Seda aitas veidi parandada väikese kordajaga $K_{\tau p}$ tuletisel põhineva kompenseerimisahela lisamine.



Joonis 3.15. Mudelist sõltumatul meetodil kompenseeritud võnkesummutite (P ja Q) juhtahelate aktiiv- ja reaktiivvõimsuse profiilid häiringu tekkel stsenaariumide A ja B ning aegviidete 200, 350 ja 500 ms korral

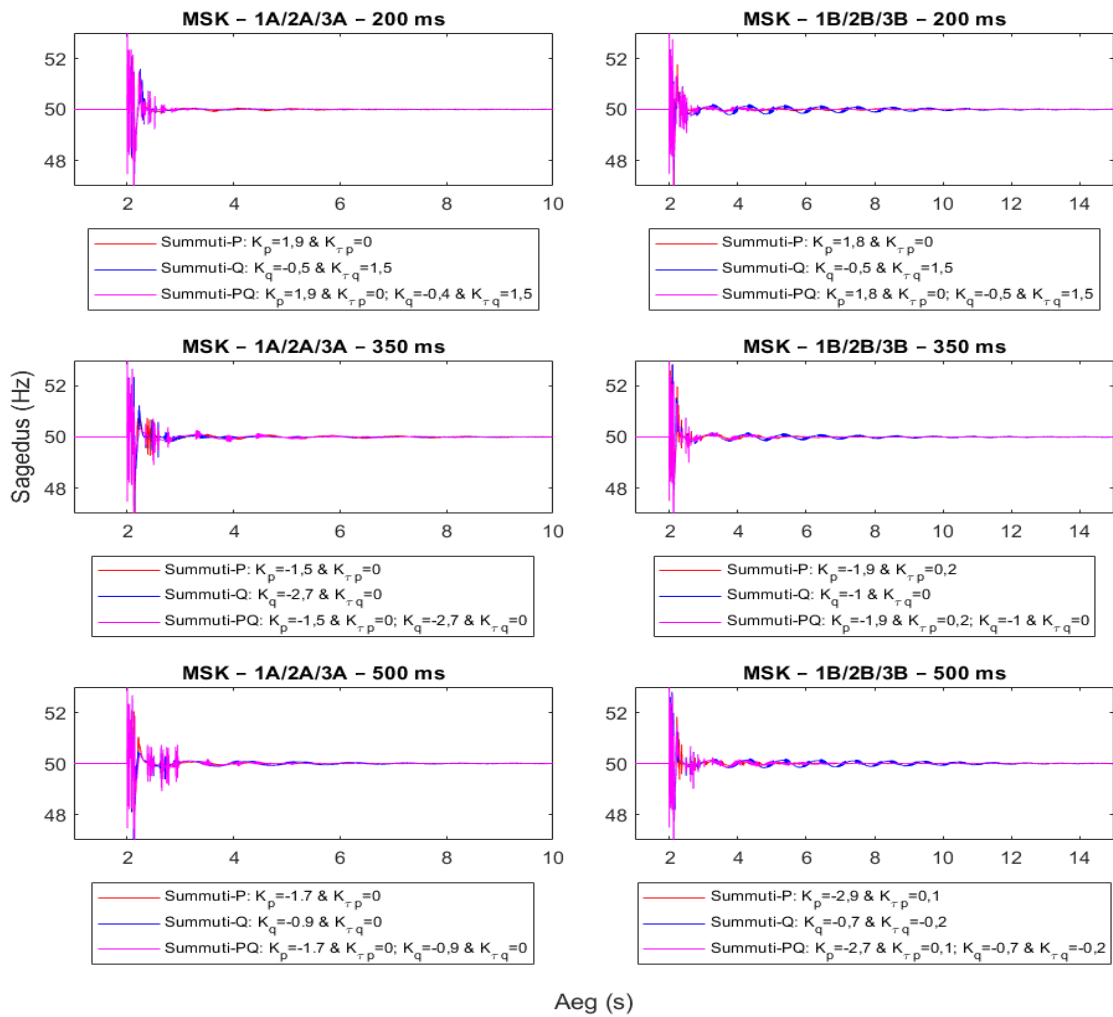


Joonis 3.16. Mudelist sõltumatul meetodil kompenseeritud võnkesummutite (PQ) juhtahelate aktiiv- ja reaktiivvõimsuse profiilid häiringu tekkel stsenaariumide A ja B ning aegviidete 200, 350 ja 500 ms korral

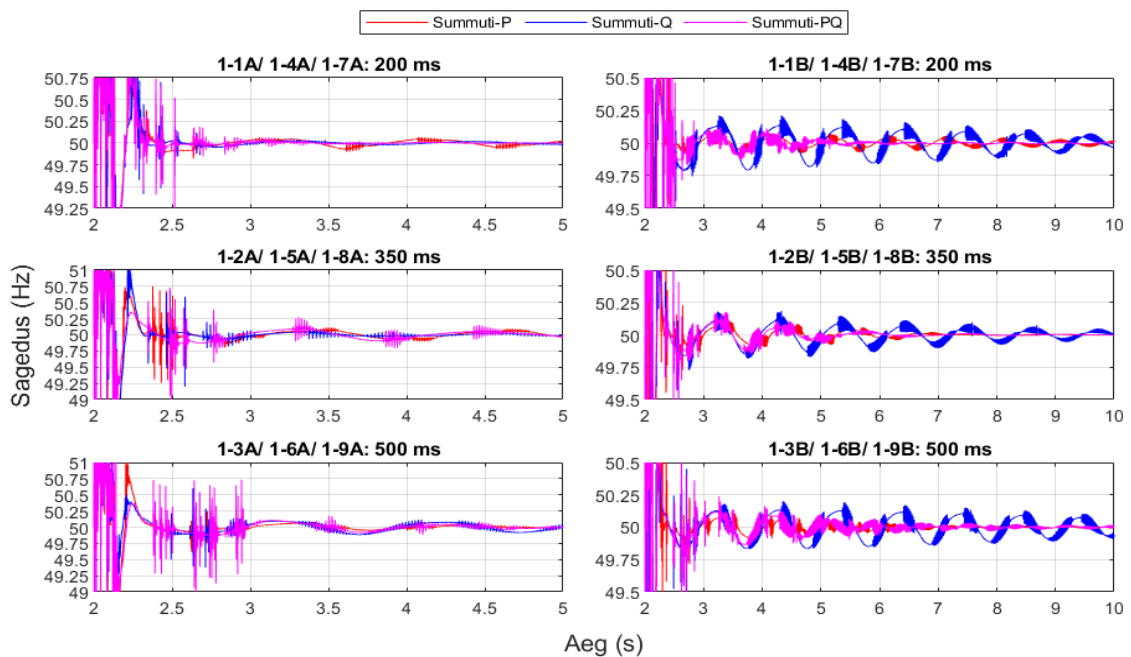
Joonis 3.17 ja joonis 3.19 illustreerivad mudelist sõltumatul meetodil kompenseeritud võnkesummutusega süsteemi sagedust ja generaatori aktiivvõimsust eelnimetatud stsenaariumide korral.

Tuleisel põhineva signaali lisamisega võnkesummutite juhtahelatele tuleb olla aga ettevaatlik, sest liiga suure toime korral muutub signaal tugevalt mürarikaks. Võnkesummuti-Q ja stsenaariumi B juhtudel oli optimaalsete kordajate leidmine veidike lihtsam ning kordajate muutmisel ei tekkinud katastroofilisi erinevusi. Vaatamata sellele ei suudetud alati ükskõik missuguste kordajate kombinatsioonide korral madalasageduslikke võnkumisi võimalikult kiiresti summutada. Seda oli võimalik natuke parandada, kui tõsta päikeseelektrijaama keske juhtkontrolleri integraatorlülil ajakonstanti, mis vähendab juhtsüsteemi äkilisust. Kuna aga võnkesummuti ahelad levinumates päikeseelektrijaama juhtseadmetes on lisatud sättepunkti järgi juhitava suletud ahela PI-regulaatori taha ega sisalda omaette integraatorlülil, siis PI-regulaatori integraalkomponendi muutmisest pole alati kasu, kui samal ajal on sättepunkti järgi juhtimine on blokeeritud.

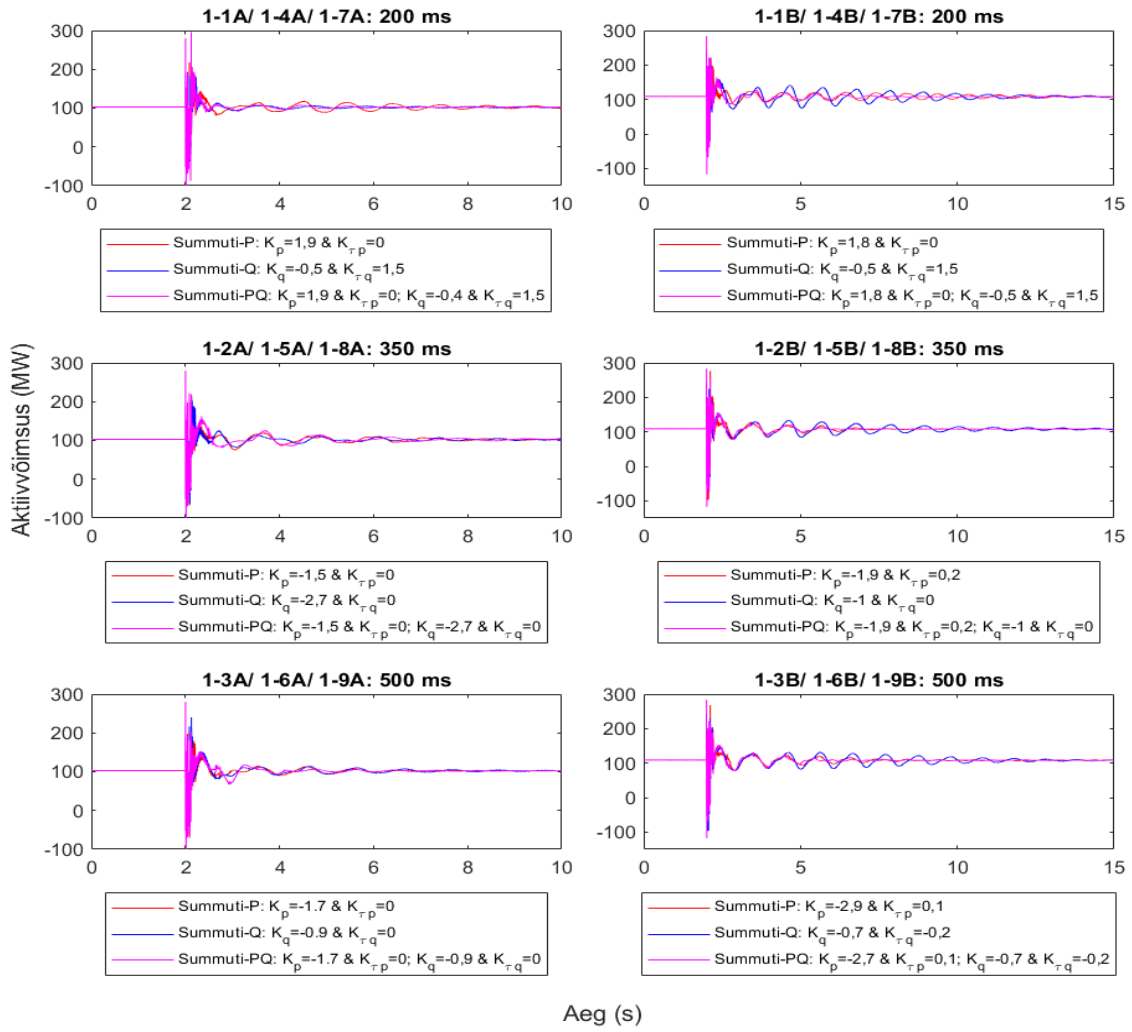
Selleks, et paremini mõista võnkeprotsesse ja nende summutamisest pärast häiringu teket, joonis 3.18 ja joonis 3.20 illustreerivad selgemini mudelist sõltumatu kompenseerimismeetodi dünaamikat sageduse ja generaator 1 aktiivvõimsuse baasil.



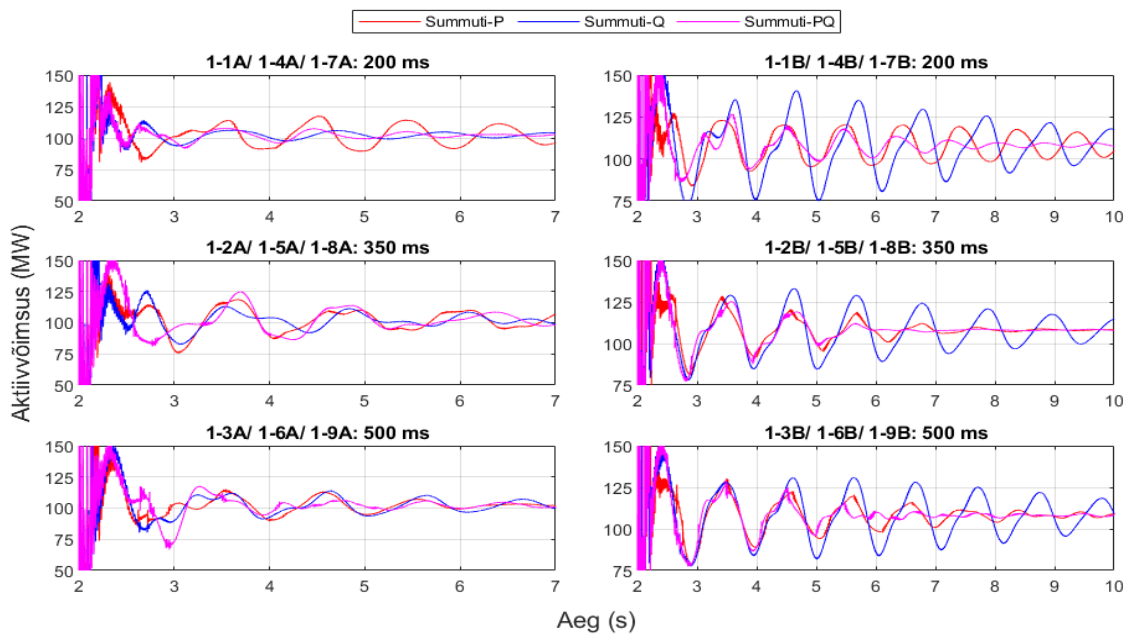
Joonis 3.17. Mudelist sõltumatul meetodil kompenseeritud võnkesummutusega süsteemi sagedus päikeseelektrijaama liitumispunktis erinevate stsenaariumide korral



Joonis 3.18. Sagedus päikeseelektrijaama liitumispunktis suurendatud kujul (joonis 3.17)



Joonis 3.19. Mudelist sõltumatul meetodil kompenseeritud võnkesummutusega süsteemi generaator 1 võimsus stsenaarium A ja B ning aegviidete 200, 350 ja 500 ms korral



Joonis 3.20. Generaatori 1 aktiivvõimsus suurendatud kujul (joonis 3.19)

Tabel 3.3 ja tabel 3.4 näitavad võnkesummutite summutusvõimekust raskete stsenaariumide (A) ja eriti raskete stsenaariumide (B) korral. Tulemused leiti Prony meetodiga sagedussignaali analüüsil. Enamasti elektrisüsteeme käsitledes ei ole huviorbiidis kõrgesageduslikud võnkumised, kui mitmel juhul summutati võnkumine nii kiiresti, et madalasageduslikke võnkumisi oli analüüsi käigus keeruline tuvastada. Tabelid näitavad, et võnkesummutid on äärmiselt efektiivsed, kuid kohati on signaal liiga üle summutatud. Erinevalt klassikalistest generaatoritest suudavad vaheldid juhtsignaalidele väga kiiresti reageerida, mis summutite vaatepunktist on kasulik. Teisest küljest võib jällegi liiga agressiivne võnkesummutus tekitada probleeme elektrikvaliteediga. Kuna selle töö eesmärk on uurida erinevate kompenseerimismeetodite efektiivsust, siis praegusel juhul muid nüansse põhjalikult ei analüüsita.

Tabel 3.3. Mudelist sõltumatul meetodil kompenseeritud võnkesummutite efektiivsus stsenaariumi A korral

Aegviide	Võnkesummuti-P		Võnkesummuti-Q		Võnkesummuti-PQ	
	Sagedus	Summutus	Sagedus	Summutus	Sagedus	Summutus
200 ms	1,035; 2,590	35,1%; 32,4%	2,613	33,7%	2,682	31,8%
350 ms	0,875; 2,021	36,9%; 37,0%	1,647	28,8%	0,677; 2,450	34,1%; 24,5%
500 ms	0,556; 2,399	43,9%; 46,5%	0,173; 2,491	30,0%; 12,2%	0,101; 2,648	22,2%; 15,6%

Tabel 3.4. Mudelist sõltumatul meetodil kompenseeritud võnkesummutite efektiivsus stsenaariumi B korral

Aegviide	Võnkesummuti-P		Võnkesummuti-Q		Võnkesummuti-PQ	
	Sagedus	Summutus	Sagedus	Summutus	Sagedus	Summutus
200 ms	0,908; 2,875	36,3%; 26,0%	1,308; 1,445	36,9%; 24,2%	1,174; 2,092	28,6%; 19,7%
350 ms	0,725; 0,856	47,6%; 33,3%	1,142; 1,260	30,8%; 21,8%	1,976	16,1%
500 ms	0,886; 2,868	42,9%; 33,%	1,135; 1,250	29,9%; 21,2%	1,032	32,2%

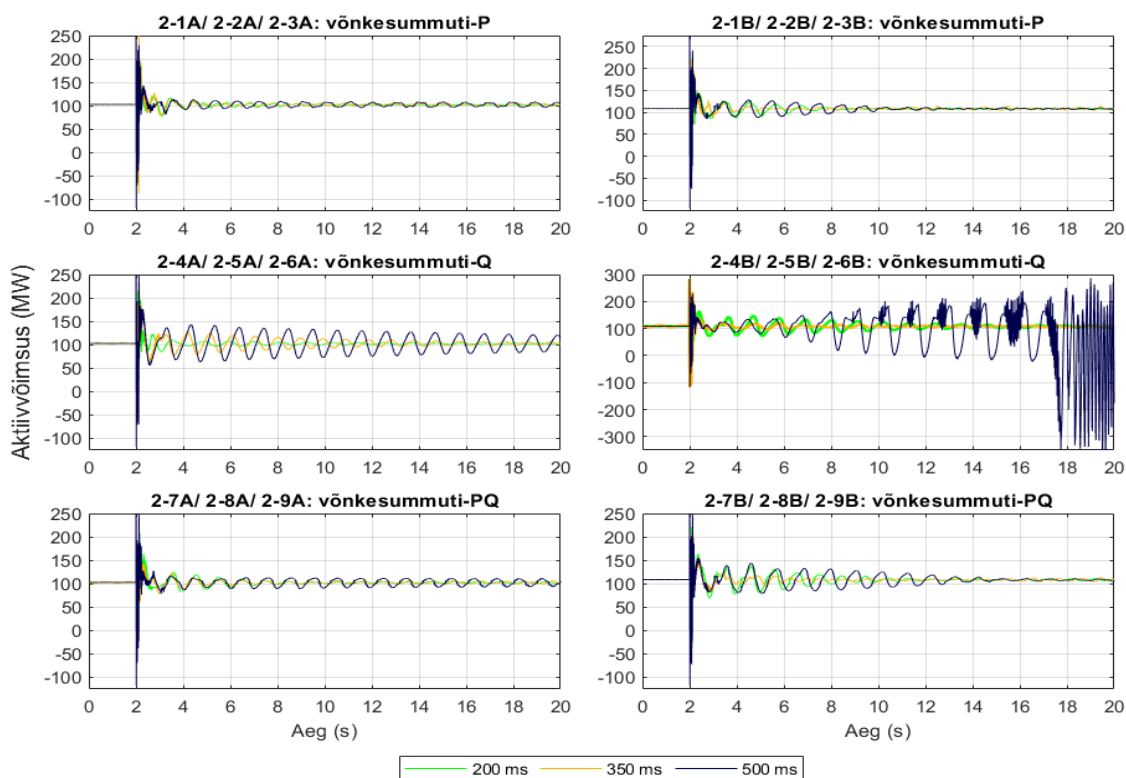
Kompenseeritud võnkesummutuse võimekus näidatud moodides ei ole oluliselt erinev A või B stsenaariumide korral. Pigem B stsenaariumide korral osutus keerukaks sobilike kordajate leidmine, mis suudaks häiringu tekkel võnkeprotsessi piisavas mahus vähendada ja mitte häiringu mõju võimendada. See tähendab, et mitte olukorda

halvendada tuleb reaalsetes olukordades eriti raskete operatiivtingimuste korral kasutada kõige optimaalsemaid parameetreid, mis sageli esinevad väga kitsas vahemikus. See tähendab, et selle meetodi kasutamisel on ohutum rikke esinedes elektrisüsteemi sõlmede hetkvõimsusi vähendada.

3.3.3 Libiseva pinna meetodil kompenseeritud summutid

Libiseva pinna meetod on samuti lihtsasti rakendatav ega nõua sobiva ülekandefunktsiooni leidmist. Meetod reageerib kiiresti sageduse hälbesignaali muutustele ja libiseva pinna juhtahela signaal korrigeerib teravalt võnkesummuti signaali õiges suunas. Libiseva pinna meetod nagu eelnev kompenseerimismeetodki nõuab parameetrite korrigeerimist. Näiteks parameetri ε (vt. jaotis 3.1.2) väärtuse langetamisel suureneb libiseva pinna signaali teravus, s.t. hüperboolne tangensfunktsioon annab suurema väljundväärtuse. Signaal läheneb 1-le või -1-le kiiremini, mis annaks sarnase tulemuse nagu ainult märgifunktsiooni kasutamisel. Libiseva pinna liigse tundlikkuse vältimiseks lisatakse ka tundetustsoon, mis on leitud eksperimentaalselt. Tõstes aga konstandi c väärtust tuletise ahelas tähendab, et signaal reageerib kiiremini aegviitega signaali muutustele.

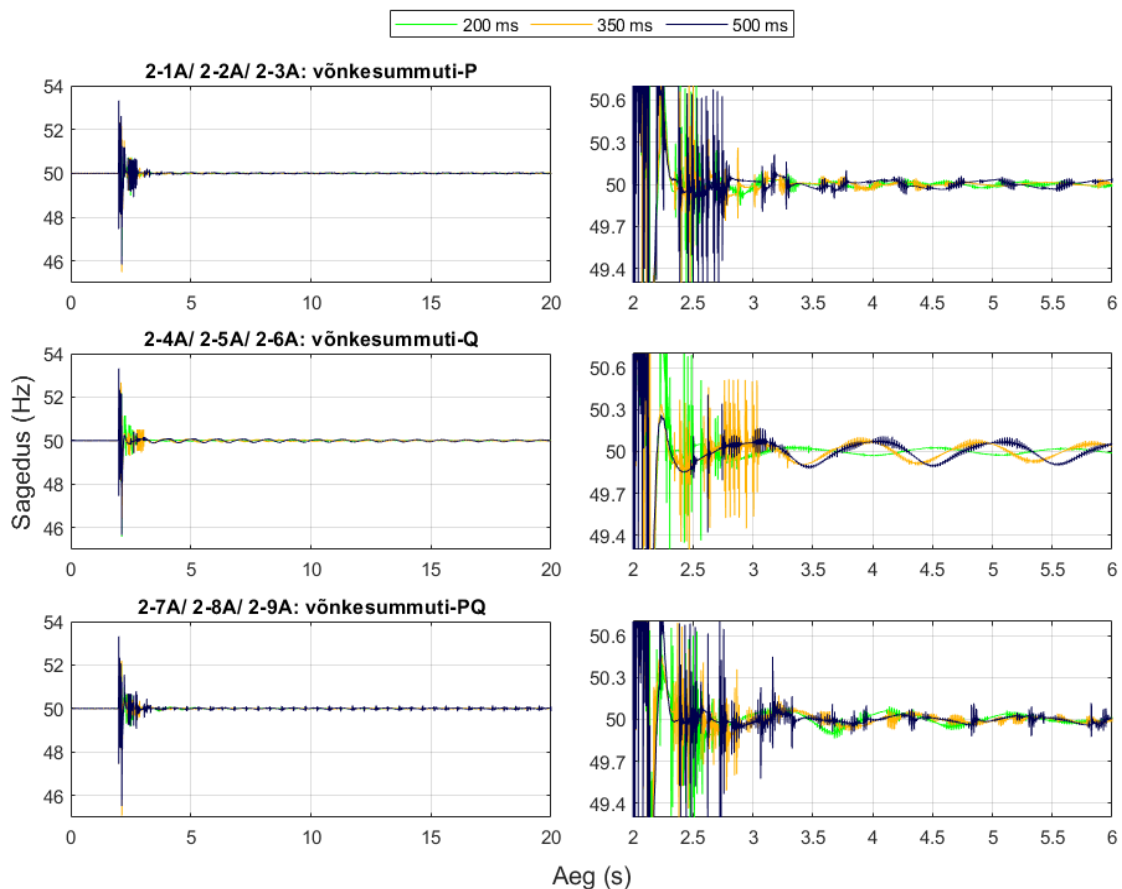
Joonis 3.21 näitab generaatori 1 käitumist peale häiringu teket, kui võnkesummutuse aegviite kompenseerimismeetodina kasutatakse libiseva pinna meetodit.



Joonis 3.21. Libiseva pinna meetodil kompenseeritud võnkesummutusega süsteemi generaatori 1 võimsus stsenaarium A ja B ning aegviidete 200, 350 ja 500 ms korral

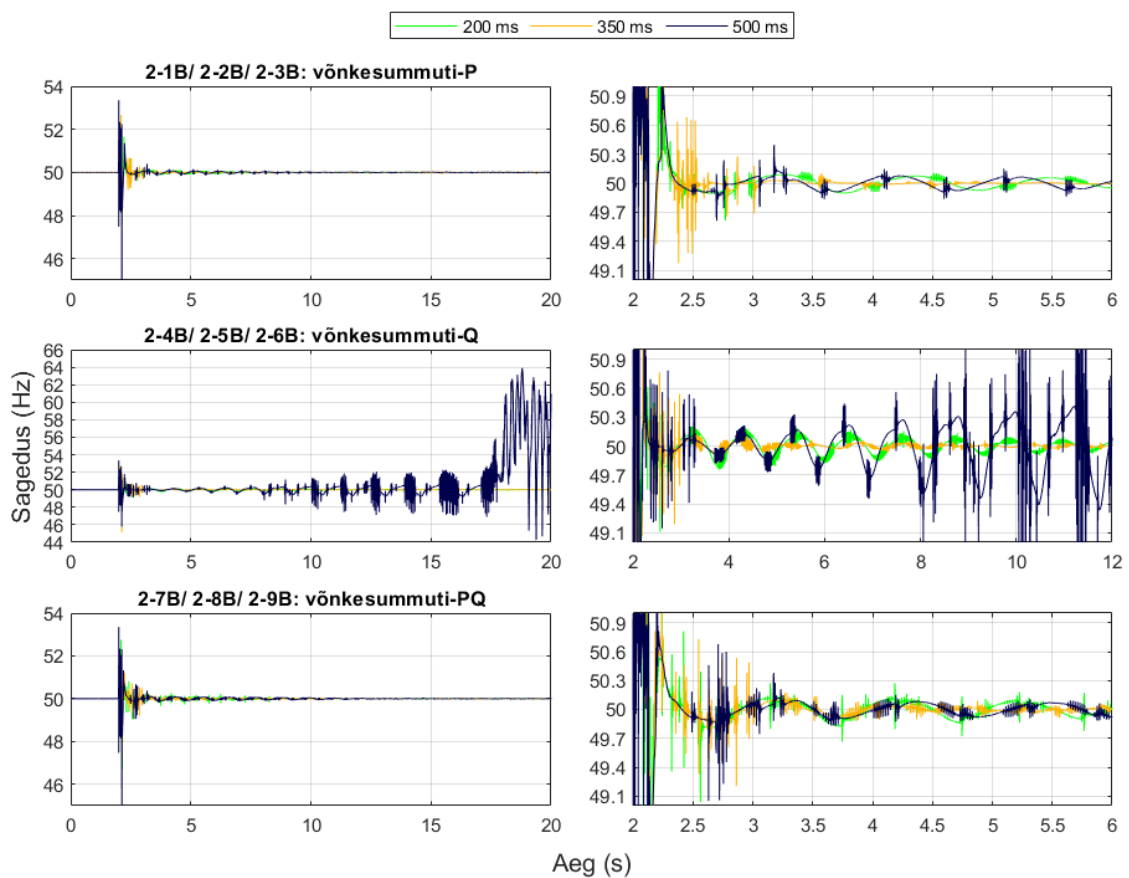
Tulemustest on näha, et väiksemate aegviidete puhul töötab meetod väga kiiresti ja efektiivselt, kuid võimsussignaali jääb siiski väikese amplituudiga püsiv võnkumine sisse. See nüanss on tõenäoliselt tingitud sellest, et teatud sageduse hälbe väärtuse juures kompenseerimismeetodi mõju kaob või ei ole enam nii efektiivne. Selle lahendamiseks on teaduskirjanduses välja pakutud mõningaid täiendavaid meetodeid, mis tuleks libiseva pinna juhtahelale lisada, kuid need ei kuulu hetkel selle magistritöö skoopi.

Joonis 3.22 ja joonis 3.23 näitavad sageduse muutumist päikeseelektrijaama liitumispunktis. Joonis 3.24 kirjeldab võnkesummutite rakendumist valitud parameetrite ja stsenaariumide korral. Tulemused kinnitavad järeldusi, mis saadi sünkroongeneraatori aktiivvõimsusprofiili analüüsil, et dünaamiline ebastabiilsus summutatakse kiiresti, aga süsteem jääb püsiseisundis võnkuma. Samuti aegviite 500 ms korral ei tööta meetod võnkesummuti-Q juhtahelas kuigi hästi. Stsenaariumi B korral ehk kõrgemate generaatorite operatiivväärtuste juures meetod enamasti on võimeline rikke tagajärjel tekkiva võnkumise summutama, kuid võimsus- ja sagedussignaali kuju on palju rohkem moonutatud.



Joonis 3.22. Libiseva pinna meetodil kompenseeritud võnkesummutusega süsteemi sagedus päikeseelektrijaama liitumispunktis stsenaarium A ning aegviidete 200, 350 ja 500 ms korral. Graafikud paremal näitavad sagedust suurendatud kujul.

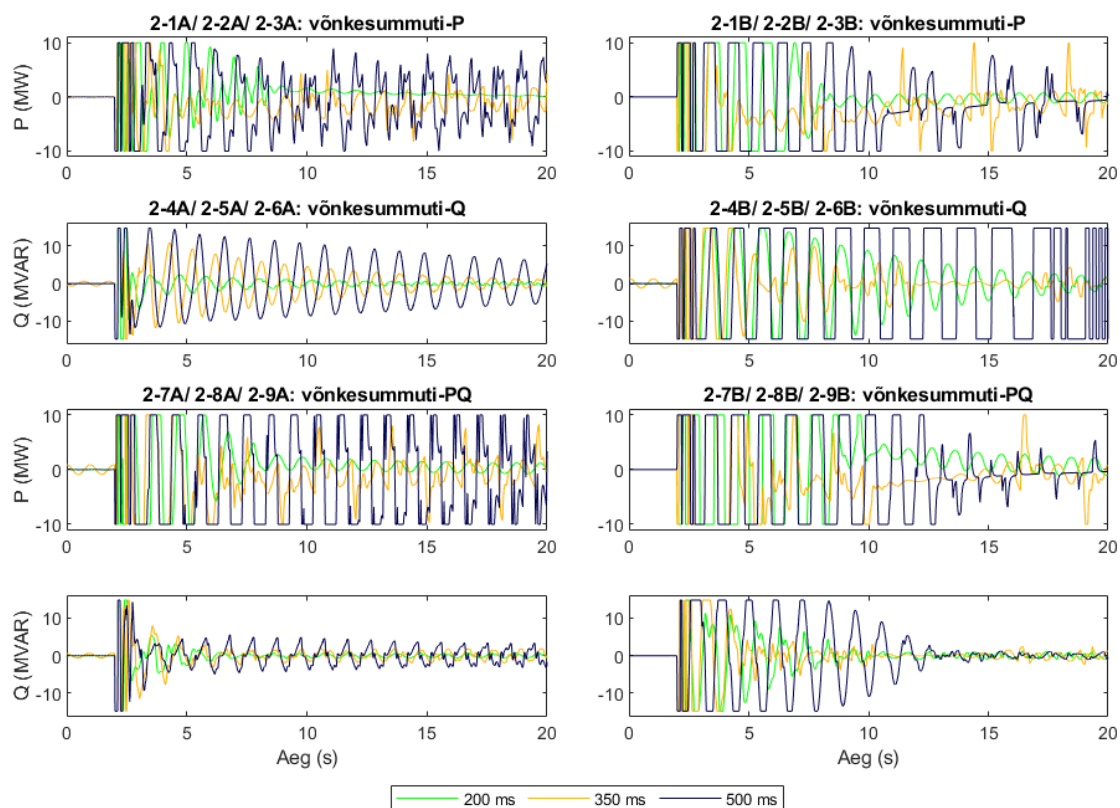
Stsenaarium B korral oli vajalik suurendada libiseva pinna juhtahela signaali tundetussooni, mis võimaldas veidikene vähendada võimsussignaali moonutuste amplituudi. Kuid tundetussooni liigne suurendamine tähendab ka, et kompenseerimismeetodi mõju kaob madalamate sagedushälvete väärtuste juures. Suuremate aegviidete juures oli vajalik ε väärtuse langetamine, kuid jällegi võib see muuta kompenseerimissignaali äärmiselt agressiivseks, mis pole elektrisüsteemide seisukohast kasulik. Konstandi c väärtus püsis enamikel juhtudel konstantne. Samuti erinevate juhtude korral oli vajalik muuta libiseva pinna juhtahela võimenduskordajat K_{smc} , mis määrab kompenseerimismeetodi osakaalu võnkesummuti juhtahelas. Üldiselt on iga stsenaariumi korral mõningane libiseva pinna juhtahela parameetrite optimeerimine vajalik ja neid väärtusi näitab tabel 3.5.



Joonis 3.23. Libiseva pinna meetodil kompenseeritud võnkesummutusega süsteemi sagedus päikeseelektrijaama liitumispunktis stsenaarium B ning aegviidete 200, 350 ja 500 ms korral. Graafikud paremal näitavad sagedust suurendatud kujul.

Mõningatel juhtudel stsenaarium B korral oli sobivate parameetrite leidmine äärmiselt keeruline või stabiilset punkti ei leitudki. Kui analüüsida libiseva pinna juhtahela võimenduskordajaid ja nende märki, siis on märgata sarnasusi kompenseerimismeetodiga – mudelist sõltumatu meetodiga - analüüsitud eelmises jaotises. Enamasti libiseva pinna meetod võimaldab eelmisest aegviite kompenseerimismeetodist kiiremat võnkesummutust, kuid alati see meetod ei tööta

efektiivselt. Samuti meetodi häiringujärgse võnkesummutuse jääknähtuseks on moonutustega signaal ning madala amplituudiga püsiva võnkumise tekkimine, mis kaob, kui liin taastatakse.



Joonis 3.24. Libiseva pinna meetodil kompenseeritud võnkesummutite aktiiv- ja reaktiivvõimsuse profiilid stsenaariumide A ja B ning aegviidete 200, 350 ja 500 ms korral

Tabel 3.5. Libiseva pinna juhtahela parameetrite väärtused

Stsenaarium	Aegviide	Summuti	Stsenaarium A			Stsenaarium B		
			K_{SMC}	ε	c	K_{SMC}	ε	c
2-1	200 ms	P	-2,0	0,05	0,2	-5,0	0,05	0,2
2-2	350 ms	P	2,0	0,01	0,1	3,0	0,01	0,1
2-3	500 ms	P	3,0	0,02	0,2	2,5	0,01	0,2
2-4	200 ms	Q	3,5	0,05	0,1	4,5	0,05	0,1
2-5	350 ms	Q	3,0	0,05	0,1	3,0	0,05	0,5
2-6	500 ms	Q	1,6	0,05	0,2	3,5	0,02	0,1
2-7	200 ms	PQ	-1,5; 2,5	0,05	0,2; 0,1	-5,0; 3,5	0,02; 0,05	0,2; 0,1
2-8	350 ms	PQ	2,0; 3,0	0,01; 0,05	0,1; 0,1	2,5; 2,5	0,01; 0,05	0,1; 0,5
2-9	500 ms	PQ	4,5; 1,7	0,02; 0,05	0,1; 0,2	2,5; -1,5	0,01; 0,02	0,2; 0,1

Simulatsioonidest selgus, et teatud parameetrite juures jäi meetod nõrgaks, et häiringu tagajärjel tekkivaid võnkumisi õigeaegselt summutada, kuid kui selle reaktsioonivõimet tugevdada, siis võnkesummutite võimsus ei koondugi nullpunktis ära, s.t. võnkesummutid jäävadki tööle. See on eriti ilmne aegviite 500 ms ja B stsenaariumide puhul. Eriti ohtlikuks muutuvad liialt tugevaks häälestatud parameetrid ka liini sulgemisel, mil süsteem peaks taastama oma stabiilse oleku, kuid sellel meetodil kompenseeritud võnkesummuti jääb mõningatel juhtudel endiselt aktiivseks. Selliselt jääb võnkesummuti juhtsignaal ja päikeseelektrijaama võimsus vahemikus 20 MW äärmiselt suurel sagedusel pendeldama. Seega võib järeldada, et seda meetodit on mõistlik kasutada väiksemate andmeside aegviidete ja mitte liialt ülekoormatud süsteemi korral.

Tabel 3.6 ja tabel 3.7 sisaldavad 12ndat järku Prony lähendusel leitud võnkesummutuse efektiivsuse tulemusi, kui kompenseeriva meetodina kasutatakse libiseva pinna režiimi.

Tabel 3.6. Libiseva pinna meetodil kompenseeritud võnkesummutite efektiivsus stsenaariumi A korral

Aegviide	Võnkesummuti-P		Võnkesummuti-Q		Võnkesummuti-PQ	
	Sagedus	Summutus	Sagedus	Summutus	Sagedus	Summutus
200 ms	0,9110	23,3%	0,9113	23,3%	0,9134	23,2%
350 ms	0,9115	23,3%	0,9128	23,4%	0,9128	23,2%
500 ms	0,9128	23,2%	0,9113	22,4%	0,9104	23,3%

Tabel 3.7. Libiseva pinna meetodil kompenseeritud võnkesummutite efektiivsus stsenaariumi B korral

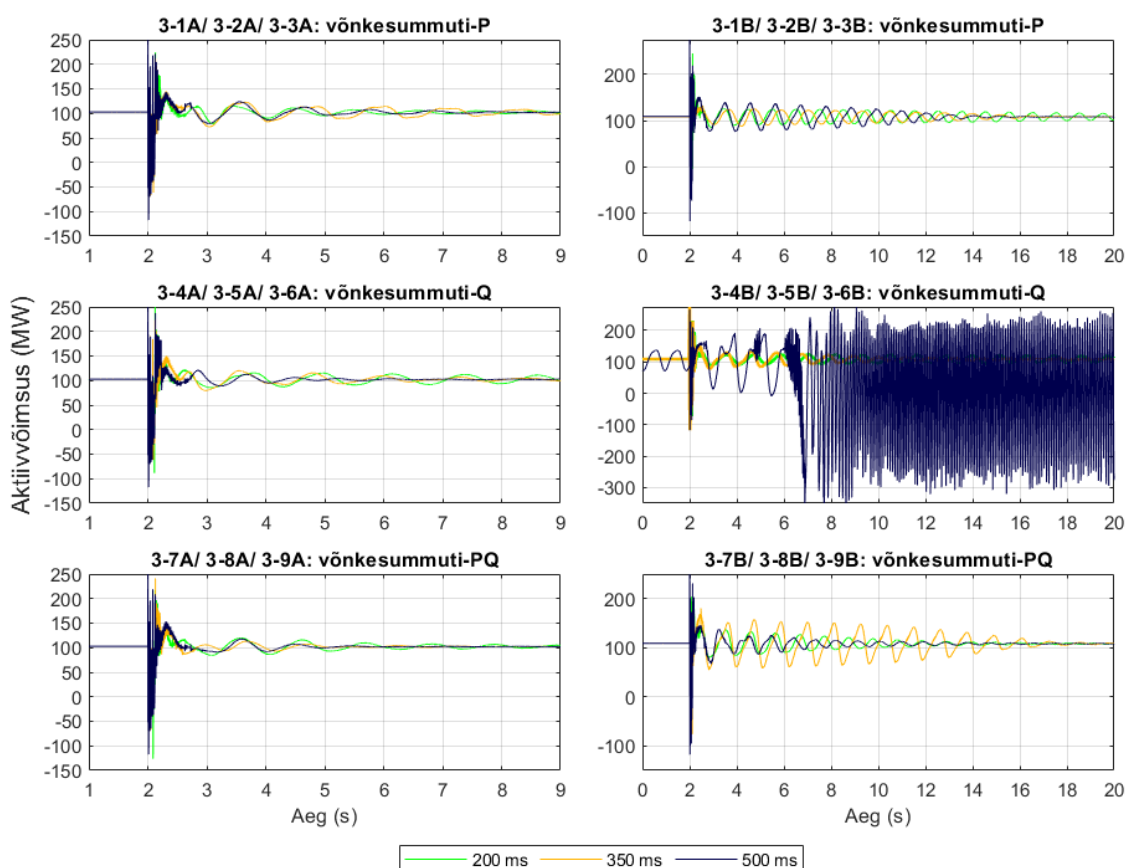
Aegviide	Võnkesummuti-P		Võnkesummuti-Q		Võnkesummuti-PQ	
	Sagedus	Summutus	Sagedus	Summutus	Sagedus	Summutus
200 ms	0,9116	23,1%	0,9146	23,0%	0,9104	23,1%
350 ms	0,9127	23,3%	0,9133	23,2%	0,9131	23,1%
500 ms	0,9121	23,2%	x	x	0,9126	25,0%

Tulemustest selgub, et selle meetodi parameetrite korrektsel optimeerimisel jääb võnkesummutuse võimekus erinevate stsenaariumite puhul sarnasesse vahemikku.

3.3.4 Smith'i meetodil kompenseeritud võnkesummutid

Nagu eelnevalt mainitud on Smith'i meetodi eesmärk aegviidet kompenseerida, ennustades süsteemi käitumist, mis teostatakse viiteta süsteemi ülekandefunktsiooni abil. Meetod eeldab, et kas ülekandefunktsioon on teada või on andmetest tuletatav. Kuna selles töös on aga süsteemi mudel olemas, mistõttu ülekandefunktsioon oli võimalik simulatsiooni andmega lähenduse teel leida. Kuna ennustusfunktsioon ei sisalda aegviidet, siis meetod peaks teoorias toimima igasuguse aegviite puhul.

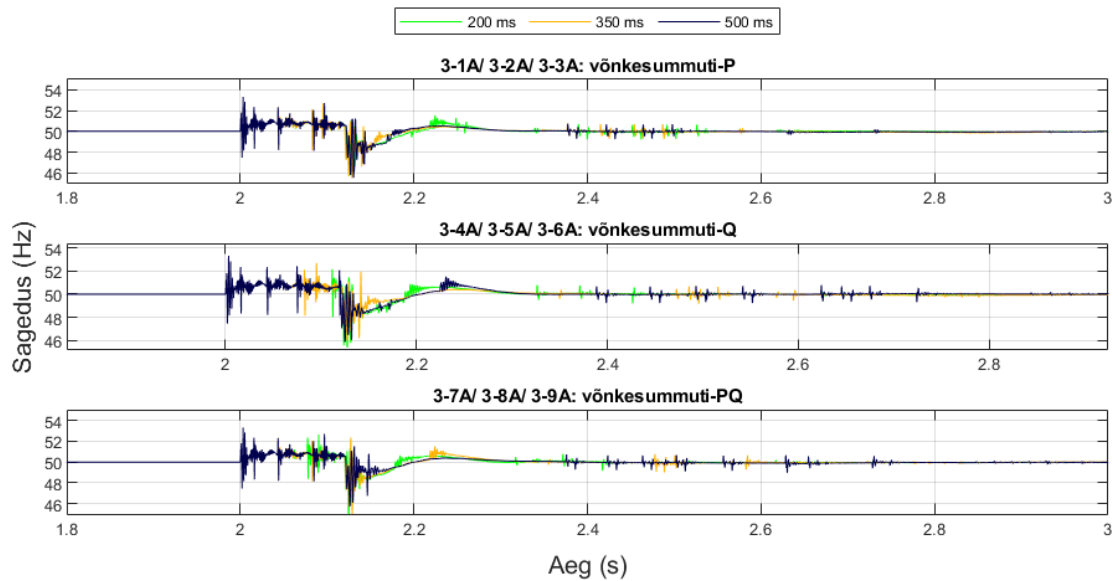
Joonis 3.25 näitab generaatori 1 nurgastabiilsust pärast häiringu teket, kui kompenseerimismeetodina kasutatakse Smith'i ennustajat. Joonis 3.26 ja joonis 3.27 illustreerivad sagedust päikeseelektrijaama liitumispunktis vastavalt stsenaariumide A ja B juhtudel.



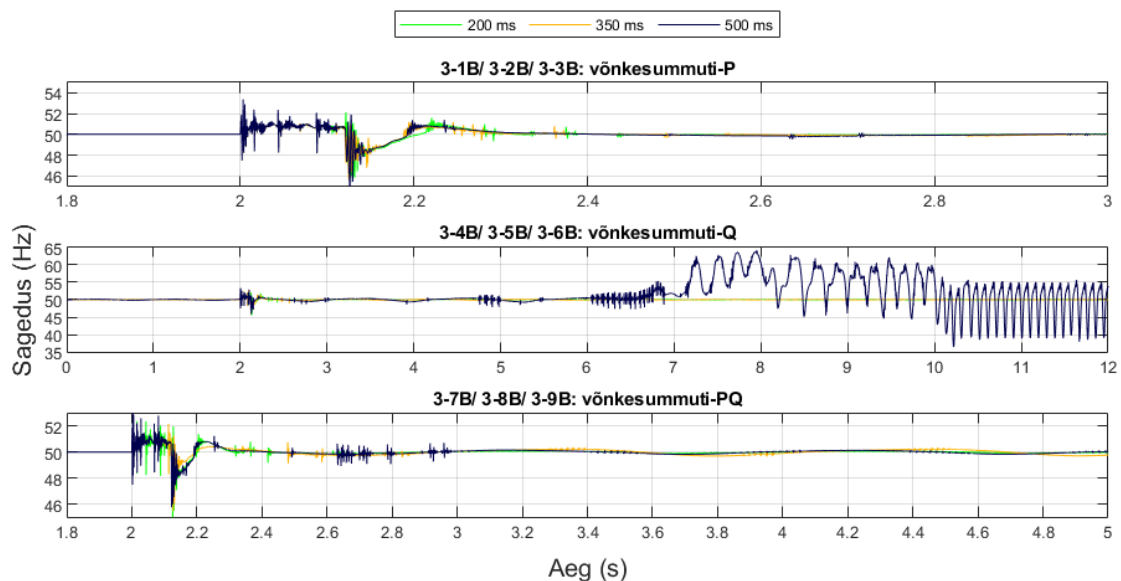
Joonis 3.25. Smith'i meetodil kompenseeritud võnkesummutusega süsteemi generaator 1 võimsus stsenaarium A ja B ning aegviidete 200, 350 ja 500 ms korral

Tulemustest selgub, et stsenaariumi A juhtudel töötab Smith'i meetod äärmiselt hästi, eriti võnkesummuti-PQ puhul, aga probleemid tekivad generaatorite kõrgemate võimsuste korral (stsenaarium B). Stsenaarium A juhtudel on kõik võnkesummuti tüübid sõltumata aegviite pikkusest võimalised võnkumised summutama juba esimesel poolsekundil. Stsenaariumi B ehk eriti rasketel juhtudel töötavad üsna efektiivselt

võnkesummuti-P ja võnkesummuti-PQ ja seda kõikide aegviidete korral. Aegviite 500 ms korral ei leitud võnkesummutile-Q sobivat võimenduskordajat vaatamata sellele, kas enne häiringut olid kõik püsivad võnkumised sumbunud või mitte. See ainult kinnitab, et reaktiivvõimsusel põhinev juhtimine on väga tundlik viite pikkusele ja igasugustele muudele mõjutustele, mis leiti töö eelmistes alajaotistes. Võnkesummuti-P aegviite kompenseerimine Smith'i meetodil on üldiselt igal juhul efektiivne. Sellest saab järeldada, et Smith'i ennustusmudeli meetodit saab kasutada ka suurte andmeside viidete puhul, aga kõik see eeldab korrektset ülekandefunktsiooni tuletamist.



Joonis 3.26. Smith'i meetodil kompenseeritud võnkesummutusega süsteemi sagedus päikeselektrijaama liitumispunktis stsenaarium A ning aegviidete 200, 350 ja 500 ms korral

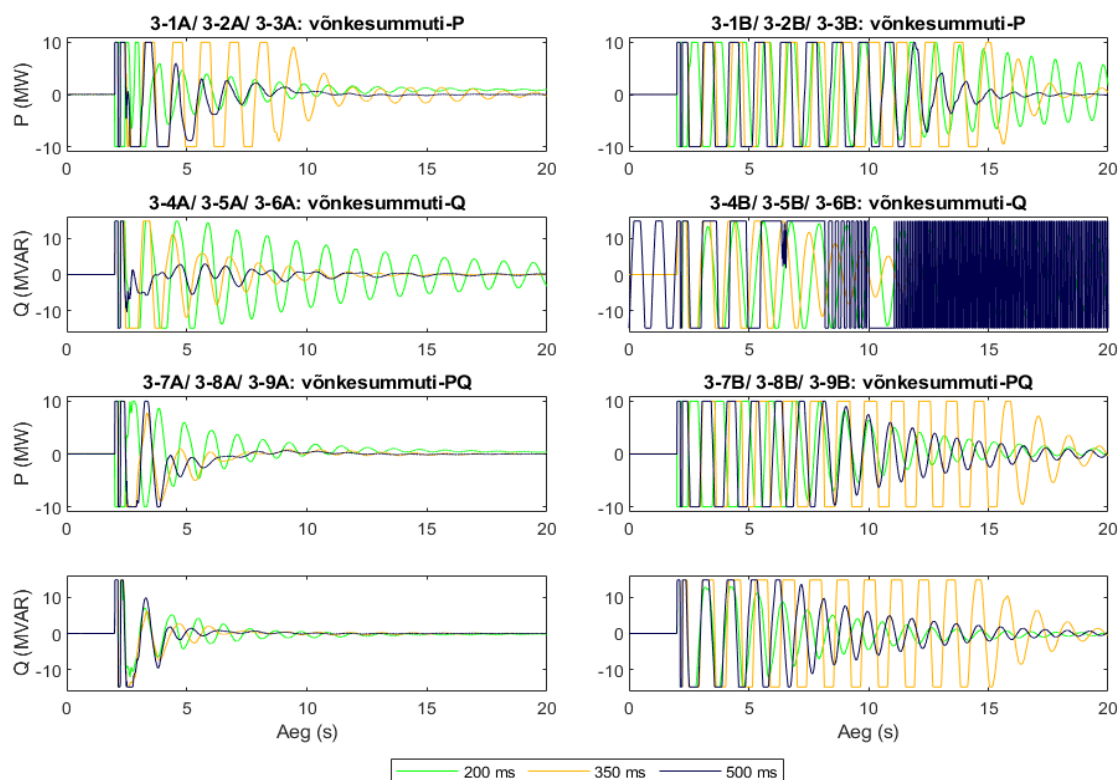


Joonis 3.27. Smith'i meetodil kompenseeritud võnkesummutusega süsteemi sagedus päikeselektrijaama liitumispunktis stsenaarium B ning aegviidete 200, 350 ja 500 ms korral

Ainuke nüanss, millele tuleb tähelepanu pöörata, on Smith'i ennustaja juhtahela võimenduskordajad $K_{SP,P}$ ja $K_{SP,Q}$ vastavalt aktiiv- ja reaktiivvõimsuse baasil töötava võnkesummuti ahelas ning nende märk. Selle väärtus sõltus nii aegviite pikkusest kui summuti tüübist ning tabel 3.8 toob välja selle väärtused kõikide stsenaariumide korral. Joonis 3.28 näitab võnkesummutite rakendumist kirjeldatud stsenaariumide korral.

Tabel 3.8. Smith'i meetodil kompenseeritud võnkesummutite võimenduskordajad

Stsenaarium	Aegviide	Võnkesummuti	Stsenaarium A		Stsenaarium B	
			$K_{SP,P}$	$K_{SP,Q}$	$K_{SP,P}$	$K_{SP,Q}$
3-1	200 ms	P	0,5	x	0,1	x
3-2	350 ms	P	-2,5	x	-1,9	x
3-3	500 ms	P	-2,5	x	-2,5	x
3-4	200 ms	Q	x	-3,5	x	-2,5
3-5	350 ms	Q	x	-3,0	x	-2,0
3-6	500 ms	Q	x	-2,0	x	-1,5
3-7	200 ms	PQ	0,25	-2,0	0,25	-2,0
3-8	350 ms	PQ	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0
3-9	500 ms	PQ	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0



Joonis 3.28. Smith'i meetodil kompenseeritud võnkesummutite aktiiv- ja reaktiivvõimsuse profiilid häiringu tekkel stsenaariumide A ja B ning aegviidete 200, 350 ja 500 ms korral

Võimenduskordajate tabelist selgub, et võnkesummuti-P korral Smith'i ennustaja juhtahela kordaja $K_{SP,P}$ muutub oluliselt suurema aegviite puhul kui 200 ms. See ilmnes ka varasemast kompenseerimata võnkesummutite analüüsist, et aegviidete 350 ms ja 500 ms korral ei suuda võnkesummuti-P häiringu tagajärjel tekkinud dünaamilist ebastabiilsust enam korvata. Seega nendel juhtudel tuleb Smith'i meetodi jaoks kasutada tugevalt negatiivset võimenduskordajat. Võnkesummuti-Q Smith'i ennustaja juhtahela võimenduskordaja $K_{SP,Q}$ eeldab negatiivset väärtust kõigi kolme uuritud aegviite korral. Selle absoluutväärtus aga väheneb andmeside viite pikkuse suurenemisel, v.a. kombineeritud võnkesummuti-PQ puhul.

Tabel 3.9 ja tabel 3.10 näitavad võnkesummutit võimekust vahemikus 0,1...3 Hz, mis saadi signaali Prony analüüsi teel. Analüüsides võnkesummutite efektiivsust iga stsenaariumi korral selgub, et A stsenaariumide puhul kõige efektiivsem võnkesummuti sõltub aegviite pikkusest. Stsenaariumi B juhtumite korral jäävad kõikide võnkesummutite efektiivsused madalaks.

Tabel 3.9. Võnkesummutite efektiivsus stsenaariumi A korral

Aegviide	Võnkesummuti-P		Võnkesummuti-Q		Võnkesummuti-PQ	
	Sagedus	Summutus	Sagedus	Summutus	Sagedus	Summutus
200 ms	0,9512	18,0%	0,8435	12,2%	0,9090	13,3%
350 ms	0,8848	11,8%	0,8982	15,3%	1,0350	18,2%
500 ms	0,9166	13,0%	1,0692	23,4%	0,9910	15,9%

Tabel 3.10. Võnkesummutite efektiivsus stsenaariumi B korral

Aegviide	Võnkesummuti-P		Võnkesummuti-Q		Võnkesummuti-PQ	
	Sagedus	Summutus	Sagedus	Summutus	Sagedus	Summutus
200 ms	1.0034	5,8%	0,9160	7,6%	0,9649	7,0%
350 ms	0,8893	9,3%	0,9707	7,5%	0,9672	0,5%
500 ms	0,9788	10,4%	x	x	1,0377	6,3%

3.3.5 Tulemuste kriitiline hinnang

Simulatsioonide tulemused andsid põhjaliku ülevaate elektrisüsteemi käitumisest häiringu tekkel. Samuti sai kinnitust asjaolu, et süsteemi stabiilsus on erinev juhtsüsteemi andmeside erisuguste aegviidete korral. Vastavalt tulemustele on võimalik

võnkesummutuseta või kompenseerimata võnkesummutitega stsenaariumide korral jõuda järgmiste järeldusteni:

- Võnkesummutite kasutamine on vajalik iga stsenaariumi ja aegviite korral. Seega dünaamilist stabiilsust ei ole võimalik saavutada muul viisil. Seejuures suurem andmeside aegviite pikkus ei tähenda alati, et võnkumised häiringu tekkimisel on suuremad. Kõrgemad generaatorite võimsused muudavad kindlasti süsteemi stabiilsuse tagamise raskemaks.
- Kui võnkesummutite juhtahelates ei võeta andmeside aegviidet arvesse, siis tõe poolest on võnkesummutite töö ebaefektiivne. Enamikel juhtudel võnkesummutid mõjutavad süsteemi isegi selle ebastabiilsust suurendavalt, eriti suurema aegviite puhul.
- Võnkesummutitest kõige paremini suudab süsteemi nurgastabiilsuse säilitada võnkesummuti-P, mis on kõige robustsem.

Eelnevate järelduste valguses on ilmselge, et andmeside viite kompenseerimine võnkesummuti juhtahelas on äärmiselt vajalik, sest vastasel korral tekib hoopis vastupidine efekt. Seega aegviite kompenseerimismeetodite analüüsi põhjal võib tulemused kokku võtta järgmiste järeldustega:

- Mudelist sõltumatu kompenseerimismeetodi rakendamisel on ülimalt oluline teada umbmäärast aegviite pikkust, sest erinevate aegviidete puhul tuleb kasutada erinevaid paremeetreid.
- Suuremate võimsuste korral on endisel mudelist sõltumatu meetodil võnkeprotsessi sumbumine saavutada, kui kasutada optimaalseid parameetreid. Nende leidmine päikeseelektrijaama juhtsüsteemi konfigureerimisel pole aga nii otsekohene. Võib kindlalt väita, et üks kindlate parameetritega lahendus ei sobi kõikidele päikeseelektrijaamadele.
- Libiseva pinna meetod on äärmiselt kiire ja üldjuhul väga efektiivne, kuid selle rakendamisel ei ole alati võimalik püsivat seisundit tagada ning madala amplituudiga võnkumine jääb alles kuni rike likvideeritakse. See peab paika nii kergemate kui keerulistema olukordade puhul ja erinevate andmeside aegviidete juures.
- Kompenseeriva ahela kordajate poolest sarnaneb libiseva pinna meetod mudelist sõltumatule meetodile. Mõlemad meetodid on ülesehituselt suhteliselt lihtsad, kuid keeruline häälestada. Libiseva pinna meetodi puhul oleks huvitav uurida ka selle meetodi edasiarendusi.

- Libiseva pinna meetodi juhtahela parameetrite valimine ei ole lihtne, õigete seaduspärasuste leidmine nõuab suures mahus arendustööd. Õigete parameetrite korral on meetod väga efektiivne, kuid valede parameetrite korral on tulemus katastroofiline. Selle kompenseerimistehnika kasutamisel tuleb kindlasti vältida juhtahelade „igaks juhuks“ liiga tugevaks häälestamist.
- Smith'i ennustusmudeli kompenseerimismeetod lihtsasti rakendatav ja ei eelda suuremat parameetrite hääletamisest, kui elektrisüsteemi mudeli ülekandefunktsioon on teada või on leitav. Sealjuures saab meetodit efektiivselt kasutada ka suuremate andmeside aegviidete korral, mis on kindlasti positiivne tulemus, kui aegviite pikkus on kergelt varieeruv.
- Smith'i meetod ei pruugi hästi toimida süsteemi suurema koormatuse juures, kui mudeli lähendus on leitud madalate operatiivparameetrite juures. Sel juhul võib Smith'i parameetrite ümber häälestamine vajalikuks osutuda.

Kokkuvõttes võib öelda, et sobiva kompenseerimismeetodi valik sõltub mitmetest tingimustest. Suuresti taandub see küsimusele, et mis kindla süsteemi ja päikesepargi puhul teada. Kui andmeside aegviite pikkus on täpselt teada ja ei ole kuigivõrd varieeruva iseloomuga, siis mudelist sõltumatu meetod võib täiesti piisav olla. Kui vajatakse võnkesummutite kiiret reageerimist suhteliselt tugevas elektrivõrgus ning potentsiaalsete võnkumiste ja häiringute iseloom on ennustatav, siis libiseva pinna meetodi kasutamine mõistlik. Kergelt varieeruva aegviite, kuid mitte suuresti muutuva inertsi süsteemi korral, on Smith'i meetodi rakendamine kõige kasulikum.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärk on tugevalt seotud olukorraga, et ühe suurema osa elektrisüsteemidest moodustab muundurpõhine elektrienergia tootmine. Traditsioonilises elektrivõrgus põhineb elektritootmine sünkroongeneraatoritel, mille puhul samuti nende juhtsüsteemid, sealhulgas võnkesummutid on enamasti lisatud pingeallika lähedale. Muundurpõhisel energiatootmisel ei teki võrgus mitte ainult inertsi tagamise probleem, vaid ka muud juhtsüsteemide rakendamise väljakutsed. Nimelt selle juhtloogikad ei asu alati allikate vahetus läheduses, vaid elektrijaama keskses juhtseadmes. Selle tõttu juhtkäskude ja mõõtmiste edastamisel tekib juhtsüsteemides andmeside aegviide, mis omakorda mõjutab juhtloogikate korrektset toimivust. Seda eriti võnkesummutite rakendamisel, mille korral perioodiliselt summutussignaali maksimaalne punkt peab esinema õigel ajal ehk olema õiges faasis. Vastasel korral võib võnkesummuti funktsionaalsus muutuda süsteemile isegi kahjulikuks. Seega selle töö raames analüüsiti sügavuti erinevaid võnkeprotsesse ja võnkesummutite kompenseerimismeetodeid andmeside aegviitega juhtsüsteemi korral.

Magistritöö põhineb 100 MW päikesepargist ja kahest sünkroongeneraatorist koosneval elektrisüsteemil, milles suure häiringu tagajärjel tekib perioodiline ebastabiilne võnkumine. Seega mudel oli koostatud selliselt, et lühise tagajärjel lülitatakse rikkega liin välja ning häiringu tagajärjel tekib süsteemis mittesumbuv dünaamiline ebastabiilsus. Võnkumiste summutamiseks konstrueeriti päikeseelektrijaama juhtsüsteemidesse aktiiv- ja reaktiivvõimsusel põhinevad võnkesummutite juhtahelad. Andmeside aegviite mõju uurimiseks lisati päikeseelektrijaama juhtseadme ja selle võrguinverterite vahele ajaline viide. Töös ei uuritud mitte ainult võnkesummutite juhtsüsteeme, vaid ka päikeseelektrijaama juhtsüsteemide muid nüansse, mille töö võib otseselt mõjutada võnkesummutite toimivust. Süsteem modelleeriti RSCAD FX keskkonnas ja simuleeriti reaajasimulaatoril RTDS ning muud arvutused teostati põhiliselt MATLAB tarkvaraga. RSCAD keskkonnas modelleeriti päikeseelektrijaam agregeeritud mudelina, mille ekvivalentsed väärtused arvuti WECC meetodit kasutades.

Võnkesummutid konstrueeriti teaduskirjanduses välja toodud suuniste, eksperimentaalsete katsetuste ja arvutusliku meetodi tulemusena. Kui aktiivvõimsusel põhineva võnkesummutusahela (võnkesummuti-P) parameetrid leiti laialt kasutatavate näidete ja katseliste simulatsioonide koostööl, siis reaktiivvõimsusel põhineva võnkesummutusahela (võnkesummuti-Q) inertse-diferentseeriva filtri parameetrid leiti arvutuslikult Prony lähendusmeetodit kasutades. Samuti võnkesummutita tulemuste põhjal teostati võnkuva signaali analüüs, mille eesmärk oli kirjeldada võnkeprotsessi ja ebastabiilsuse olemust. Erinevate võnkesummutite toimivust ja mõju häiringu tekkel

aegviiteta süsteemis testiti kahe erinevase raskusega stsenaariumi korral. Esimesel juhul olid sünkroongeneraatorite talitlusvõimsused väiksemad (stsenaarium A) ja teise puhul kõrgemad (stsenaarium B).

Päikeseelektrijaama juhtsüsteemi aegviite kompenseerimiseks kasutati võnkesummutite juhtahelates kolme meetodit: mudelist sõltumatut, libiseva pinna ja Smith'i ennustaja meetodit. Nendest esimene meetod jaguneb omakorda kaheks, millest üks baseerub ainult võnkesummuti võimendusteguri korrigeerimises, aga teine eeldab mõõte- ja referentsväärtuse vahelise hälbesignaali esimese tuletise võtmist ja lisamist võnkesummuti juhtahelale. Selliselt on võimalik süsteemi dünaamikat ette ennustades Modbus kommunikatsiooniviitest tulenevat andmevahetuse hilinemist kompenseerida. Libiseva pinna kompenseerimismeetod sarnaneb äsja mainitud meetodile, kuna sisaldab samuti esimest järku tuletise juhtahelat, kuid seda ei liideta otse võnkesummuti ahelale, vaid kasutatakse hälbesignaali suuna ja märgi ennustamiseks. Smith'i meetod eeldab aga aegviiteta süsteemi võimalikult korrektse ülekandefunktsiooni leidmist, mida kasutatakse süsteemi väljundväärtuste ja käitumise ette ennustamiseks elektrijaama keskses juhtseadmes juba enne kui juhtkäsud võrguinverteritele edastatakse.

Aegviitega süsteemi juhtumuring oli jaotatud paarikümneks stsenaariumiks, millest esimese bloki moodustasid baasstsenaariumid ehk erinevate aegviidete ja kompenseerimata võnkesummutitega juhud. Teise bloki stsenaariumid viitasid mudelist sõltumatul kompenseerimismeetodil saadud tulemustele, kolmas blokk libiseva pinna meetodi tulemustele ja neljas blokk Smith'i ennustajamudeli simulatsioonidele. Kuna põhivõrguoperaator on määranud, et kommunikatsiooni viide võib juhtsüsteemides olla mitte suurem kui 0,5 sekundit, siis seda võeti stsenaariumide kirjeldamisel arvesse.

Võnkesummutita ja kompenseerimata võnkesummutitega stsenaariumide korral analüüsiti süsteemi reageerimist häiringule erinevate pikkusega päikeseelektrijaama juhtsüsteemi viidete juures ja võnkesummuti mõju, kui aegviidet pole veel arvesse võetud. Selle tulemusel kinnitati hüpotees 1, et aegviidet mitte arvesse võtvad võnkesummutite ahelad suurendavad elektrisüsteemi dünaamilist ebastabiilsust ehk mõjuvad võnkeprotsessi sumbumisele kahjulikult. Samuti leiti, et pikem aegviide vähendab võnkesummutite efektiivsust, kuid võnkumiste suurus ja ebastabiilsus ei ole alati proportsionaalne aegviite pikkusega (hüpotees 2).

Andmeside viidete kompenseerimismeetodite analüüsil leiti, et igasugune aegviide kuni 500 millisekundini on võimalik ühel või teisel meetodil kompenseerida, millega kinnitati hüpotees 3. Tulemuste järgse analüüsi arutelus jõeldati, et ühe või teise kompenseerimismeetodi eelistamine sõltub suuresti päikeseelektrijaama asukohast, informatsioonist selle sideühenduste kohta, elektrisüsteemi talitlusparameetrite

prognoositavusest ja meetodi keerukusest. Näiteks võnkesummutite andmeside viite kompenseerimine libiseva pinna meetodil on efektiivsem lühemate aegviidete puhul (hüpotees 4), kuid see pole tõene iga meetodi puhul. Smith'i meetodi funktsionaalsus sõltub pigem generaatorite talitusparameetritest kui viite pikkusest, s.t. kõrgemalt koormatud elektrisüsteemide dünaamilist ebastabiilsust on keerulisem kompenseerida kui vähem koormatud süsteeme. See Smith'i meetodi puhul kinnitab hüpoteesi 5, kuid teiste meetodite puhul lükatakse hüpotees jällegi ümber. Ühesõnaga hüpoteesi 4 ja 5 tõesus sõltub meetodist.

Soovitused edasiseks tööks

Andmeside aegviidete kompenseerimismeetodite kirjanduslikul ülevaatel leiti, et selle probleemi lahendamiseks on välja pakutud veel mitmeid teisigi meetodeid, mida oleks huvitav analüüsida. Enamasti olid need keerukamad kui selles töös kasutatud meetodid, kuid kui nende rakendamine annaks paremaid tulemusi, siis muude meetodite uurimine oleks soovitatav. Samuti teaduskirjanduses on välja pakutud töös kasutatud meetodite edasiarendusi. Näiteks libiseva pinna meetodi puhul võiks uurida „*SuperTwisting*” algoritme [43] või teiste meetodite puhul testida, kas oleks mõistlik kasutada PI-regulaatori ja muudest lülidest koosnevaid kombineeritud lahendusi.

Lisaks erinevate meetodite uurimisele võib olla mõistlik ka pikemate aegviidete uurimine. Samuti meetodite keerukuse vähendamiseks oleks äärmiselt vajalik välja töötada metoodiline kirjeldus parameetrite valikuks reaalsete muundurpõhiste elektrijaamade projektide puhul.

SUMMARY

The purpose of this master's thesis is closely linked to the fact that one of the largest components of modern power systems is inverter-based electricity generation. In traditional power grids, electricity generation relies on synchronous generators, where control systems, including power oscillation dampers, are typically implemented near the power source. In contrast, inverter-based generation not only raises challenges related to maintaining inertia but also poses difficulties in designing control systems.

Specifically, the control logics in inverter-based systems are not located near the power-generating unit but rather in the power plant controller. As a result, communication time delays occur when dispatching setpoints and measurements between the system components, which can impair the control system's performance. This issue is particularly significant when applying oscillation damping control, as the peak of the periodic damping signal must align precisely with the optimal moment. Otherwise, the oscillation damper may inadvertently harm the system's performance. Therefore, this thesis thoroughly examines oscillation processes and compensation methods for power oscillation damping functionalities within a control system affected by communication time delays.

This master's thesis focuses on a power system including a 100 MW solar park and two synchronous generators, where periodic unstable oscillations arise due to a significant disturbance. To simulate this scenario, the model was configured such that a line was disconnected following a short circuit, resulting in undamped dynamic instability. To mitigate the oscillations, active and reactive power-based oscillation damping control circuits were developed within the control systems of the solar power plant.

To assess the impact of communication delay, a time delay was introduced between the solar power plant's control unit and its grid inverters. The study not only examined the oscillation damper control systems but also explored other aspects of the solar power plant's control systems, whose operation could directly influence the effectiveness of the power oscillation damping.

The system modelling was conducted in the RSCAD FX environment, and simulations were performed on the RTDS real-time simulator, with additional calculations primarily carried out using MATLAB software. In RSCAD, the solar power plant was represented as an aggregated model, with equivalent values determined using the WECC method.

The design of the power oscillation damping (POD) control loops was based on guidelines from scientific literature, experimental testing, and computational methods. The parameters of the active power-based damper circuit (POD-P) were determined through

a combination of commonly used examples and experimental simulations. In contrast, the parameters of the lead-lag filter in the reactive power-based damper circuit (POD-Q) were calculated using the Prony approximation method.

Additionally, an analysis of the oscillating signal without dumping was conducted to characterize the oscillation process and the power system's instability. The performance of different power oscillation dumping circuits and their influence on disturbance response in a time-delayed system were evaluated in two scenarios of varying severity: Scenario A, where the synchronous generators operated at lower power levels, and Scenario B, where these operated at higher power levels.

Three methods were implemented in the power oscillation damping Control circuits to compensate for the time delay in the solar power plant control system: the model-independent method, the sliding mode control (SMC) method, and the Smith predictor (SP) method.

The model-independent method is further divided into two approaches. The first approach adjusts only the POD's gain factor, while the second involves calculating the first derivative of the deviation signal between the measured and reference values and integrating it into the damper's control circuit. This approach allows for compensating the data exchange delay caused by the Modbus communication delay by predicting the system dynamics.

The sliding mode control compensation method follows a similar principle, as it also incorporates a first-order derivative control circuit. However, unlike the model-independent method, the derivative control is not directly linked to the POD circuit but is instead used to predict the direction and sign of the deviation signal. In contrast, the Smith predictor method involves identifying the most accurate transfer function for a system without a time delay. This function is then used to forecast the system's output values and behaviour within the power plant's central control unit before dispatching control commands to the grid inverters.

The case study of the time-delayed system was structured into several dozen case scenarios. The first group consisted of base scenarios, representing cases with various time delays and uncompensated dampers. The second group focused on the results obtained using the model-independent compensation method, while the third group analysed the outcomes of the sliding mode control method. The fourth group comprised simulations based on the Smith predictor model. When designing the scenarios, the transmission grid operator's requirement that the communication delay in control systems must not exceed 0.5 seconds was taken into account.

In undamped cases and scenarios with uncompensated damping, the system's response to disturbances was analysed for various lengths of time delays within the solar power plant control system. Additionally, the impact of the damper when time delay was not considered was assessed. The analysis confirmed Hypothesis 1: damper circuits that do not account for time delay exacerbate the dynamic instability of the power system, negatively affecting the damping of oscillations. Furthermore, it was observed that while a longer time delay generally reduces the effectiveness of POD circuits, the magnitude and instability of oscillations do not consistently correlate with the length of the delay (confirming Hypothesis 2).

The analysis of communication delay compensation methods revealed that any time delay of up to 500 milliseconds can be effectively compensated by at least one method, thereby confirming Hypothesis 3. The discussion of the analysis results highlighted that the choice of compensation method largely depends on factors such as the solar power plant's location, the characteristics of its communication connections, the predictability of the power system's operation parameters, and the complexity of the chosen method.

For instance, the sliding mode control method proved more effective for shorter time delays, which supports Hypothesis 4. However, this outcome is consistent across various compensation methods. In contrast, the effectiveness of the Smith method is influenced more by the operating parameters of the generators than by the delay length. Specifically, it is more challenging to compensate for the dynamic instability in heavily loaded power systems compared to lightly loaded ones, confirming Hypothesis 5 for the Smith method. However, for other methods, Hypothesis 5 does not hold, indicating that the validity of Hypotheses 4 and 5 is method-dependent.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Elering AS, „Elektri tarbimine ja tootmine,“ 09.05.2025. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.elering.ee/elektri-tarbimine-ja-tootmine>. [Kasutatud 11.05.2025].
- [2] Elering AS, „Eesti varustuskindluse aruanne,“ 2024. [Võrgumaterjal]. Available: https://elering.ee/sites/default/files/2024-12/Elering_VKA_2024.pdf. [Kasutatud 11.05.2025].
- [3] Z. Rafique, H. M. Khalid, S. M. Muyeen ja I. Kamwa, „Bibliographic review on power system oscillations damping: An era of conventional grids and renewable energy integration,“ *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, kd. 136, nr 107556, 2022.
- [4] Vabariigi Valitsus, „Riigi Teataja: Võrgueeskiri,“ 01.07.2003. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/111082015004>.
- [5] M. Bernal-Sancho, M. P. Comech ja N. Gal'an-Hern'andez, „Damping control in renewable-integrated power systems: A comparative analysis of PSS, POD-P, and POD-Q strategies,“ *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, kd. 162, nr 110308, 2024.
- [6] Eesti Teadusinfosüsteem, „TEM-TA134: Elektrisüsteemide optimaalne ja töökindel juhtimine suuremahulise taastuvenergeetika raamistikus,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.etis.ee/Portal/Projects/Display/52ce6345-8122-4bd6-9b51-626b4dd93251>.
- [7] M. Meldorf ja J. Kilter, Elektrisüsteemi stabiilsus, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2011.
- [8] R. K. Varma, Smart Solar PV Inverters with Advanced Grid Support Functionalities, London, Kanada: IEEE Press, 2022.
- [9] E. Bullich-Massagué, R. Ferrer-San-José, M. Aragués-Peñalba, L. Serrano-Salamanca, C. Pacheco-Navas ja O. Gomis-Bellmunt, „Power plant control in large-scale photovoltaic plants: design, implementation and validation in a 9.4 MW photovoltaic plant,“ *IET Renewable Power*, kd. 10, nr 1, pp. 50-62, 2016.
- [10] V. Gevorgian ja B. O'Neill, „Advanced Grid-Friendly Controls Demonstration Project for Utility-Scale PV Power Plants,“ National Renewable Energy Lab, Golden, CO, 2016.
- [11] N. Hatziargyriou, Microgrids Architecture and Control, Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2014.
- [12] P. S. R. Murty, Operation and Control in Power Systems, Second edition toim., Leiden: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011.
- [13] E. Mateu-Barriendos, O. Alican, J. Renedo, C. Collados-Rodriguez, M. Martin, E. Nuño, E. Prieto-Araujo ja O. Gomis-Bellmunt, „Power Oscillation Damping Controllers for Grid-Forming Power Converters in Modern Power Systems [draft],“ *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024.
- [14] P. S. Kundur ja O. P. Malik, Power System Stability and Control, Second toim., McGraw Hill, 2022.
- [15] Red Eléctrica de España, „Guide for the implementation of power oscillation damping controllers,“ 24.09.2024. [Võrgumaterjal]. Available:

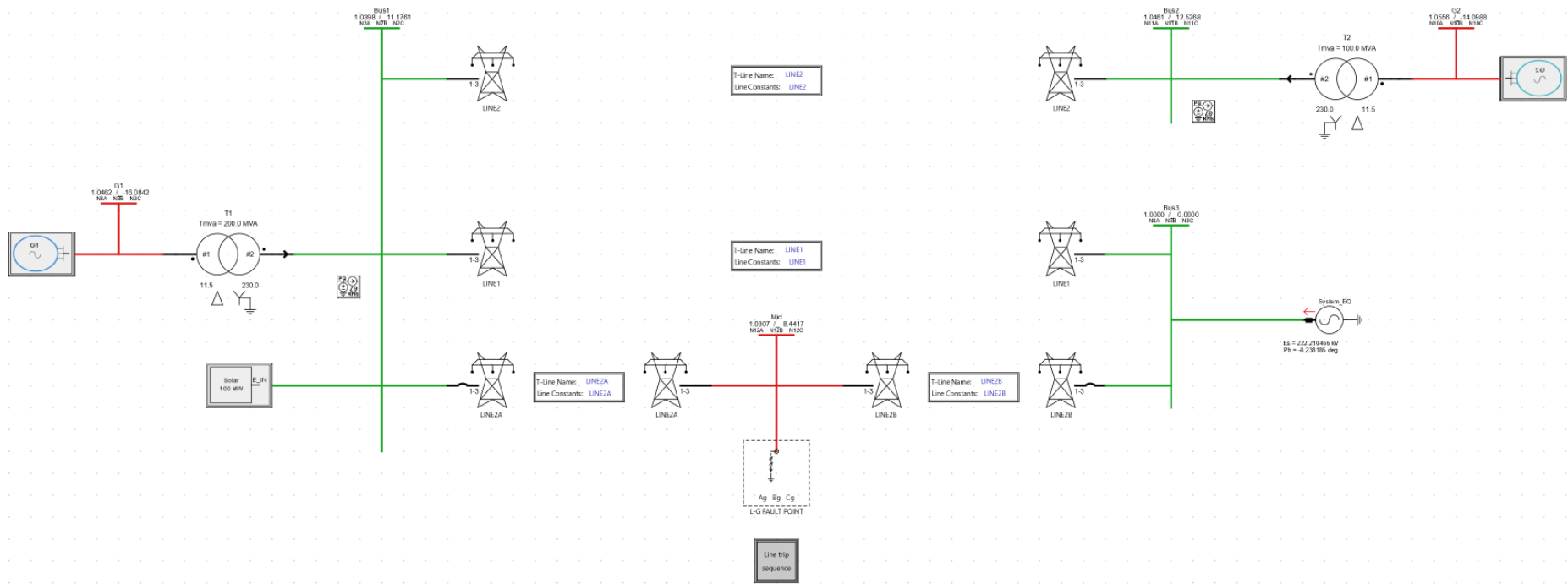
https://www.ree.es/sites/default/files/12_CLIENTES/Documentos/GT_POD_guia_i mplementacion_controles_POD_EN.pdf. [Kasutatud 13.01.2025].

- [16] M. Čuljak, M. Beus ja H. Pandzic, „Development of a LabVIEW - Based Data Logging and Monitoring Application for a Photovoltaic Power Plant at FER,“ *Journal of Energy*, kd. 70, nr 3, 2021.
- [17] C. M. Steenberg, „Will Modbus TCP be the dominant communication standard for C&I solar inverter environments going forward?,“ PVTECH, 08 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.pv-tech.org/will-modbus-tcp-be-the-dominant-communication-standard-for-ci-solar-inverter-environments-going-forward/>. [Kasutatud 22.02.2025].
- [18] „What is the difference between Modbus RTU and TCP?,“ sell-best, [Võrgumaterjal]. Available: <https://sell-best.com/what-is-the-difference-between-modbus-rtu-and-tcp/>. [Kasutatud 05.04.2025].
- [19] S. Rompotis, J. Konstantaras, A. Ktena, L. Sarakis ja C. Manasis, „A Monitoring System for PV plants using Open Technologies,“ *IEEE 7th International Energy Conference (ENERGYCON)*, Riia, 2022.
- [20] N. Jankovic, J. Roldán-Pérez, M. Prodanovic ja L. Rouco, „Centralised Multimode Power Oscillation Damping Controller for Photovoltaic Plants With Communication Delay Compensation,“ *IEEE Transactions on Energy Conversion*, kd. 39, nr 1, pp. 311 - 321, 2023.
- [21] D. del Rivero, P. G. Fernández, C. Blanco ja A. n. Navarro-Rodríguez, „Control of Aggregated Virtual Synchronous Generators Including Communication Delay Compensation,“ *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Detroit, MI, 2022.
- [22] D. Pattabiraman ja P. Bixel, „Minimizing Interactions Between Power Plant Controller and Inverters in IBR Plants,“ *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, Anaheim, CA, 2024.
- [23] Elering AS, *Euroopa Komisjoni määruse nr 2016/631 artikkel 7 lõike 4 alusel Elering AS-i poolt kehtestatud siseriiklikud sätted elektritootmisüksuste võrku ühendamise nõuete kohta*, Tallinn, 2019.
- [24] R. Shah, N. Mithulananthan, ja K. Y. Lee, „Large-Scale PV Plant With a Robust Controller Considering Power Oscillation Damping,“ *IEEE Transactions on Energy Conversion*, kd. 28, nr 1, pp. 106 - 116, 2013.
- [25] M. Liu, I. Dassios ja F. Milano, „Delay margin comparisons for power systems with constant and time-varying,“ *Electric Power Systems Research*, kd. 190, 2021.
- [26] F. Milano, M. Liu ja G. Tzounas, „A Model-Independent Delay Compensation Method for Power Systems,“ *IEEE Milan PowerTech*, Milan, 2019.
- [27] H. Yan, X. Zhou, H. Zhang, F. Yang ja Z.-G. Wu, „A Novel Sliding Mode Estimation for Microgrid Control With Communication Time Delays,“ *IEEE Transactions on Smart Grid*, kd. 10, nr 2, pp. 1509 - 1520, 2019.
- [28] D. del Rivero, P. García, C. Blanco ja Á. Navarro-Rodríguez, „Control of Aggregated Virtual Synchronous Generators for PV Plants Considering Communication Delays,“ *IEEE Transactions on Industry Applications*, kd. 60, nr 4, pp. 6512 - 6523, 2024.
- [29] I. Abdulrahman, R. Belkacemi ja G. Radman, „Power oscillations damping using wide-area-based solar plant considering adaptive time-delay compensation,“ *Springer Energy Systems*, kd. 12, p. 459–489, 2021.

- [30] S. Gurung, F. Jurado, S. Naetiladdanon ja A. Sangswang, „Optimized tuning of power oscillation damping controllers using probabilistic approach to enhance small-signal stability considering stochastic time delay,“ *Springer Electrical Engineering*, kd. 101, p. 969–982, 2019.
- [31] „Stability region analysis in Smith predictor configurations using a PI controller,“ *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, kd. 37, nr 5, 2014.
- [32] A. González, M. Aranda, G. López-Nicolás ja C. Sagüés, „Time delay compensation based on Smith Predictor in multiagent formation control,“ *IFAC-PapersOnLine*, kd. 50, nr 1, pp. 11645-11651, 2017.
- [33] M. Esmaili ja M. Shirvani, „Time Delay Compensation by A PID Controller,“ *IEEE International Conference on System Engineering and Technology (ICSET)*, 2011.
- [34] M. T. Emirler, B. A. Güvenç ja L. Güvenç, „Communication disturbance observer approach to control of integral plant with time delay,“ *9th Asian Control Conference (ASCC)*, Istanbul, 2013.
- [35] A. Shamisa, B. Majidi ja J. C. Patra, „Sliding-Window-Based Real-Time Model Order Reduction for Stability Prediction in Smart Grid,“ *IEEE Transactions on Power Systems*, kd. 34, nr 1, pp. 326 - 337, 2019.
- [36] R. Musca, F. Gonzalez-Longatt ja C. A. Gallego Sánchez, „Power System Oscillations with Different Prevalence of Grid-Following and Grid-Forming Converters,“ *Integration of Power Electronics in Power Systems*, kd. 15, 2022.
- [37] RTDS Technologies, *RSCAD 2.3 Controls Library Manual*, 2023.
- [38] RTDS Technologies, *RSCAD Manual*, 2023.
- [39] WECC Wind Generator Modeling Group, „WECC Wind Power Plant Power Flow Modeling Guide,“ May 2008. [Vörgumaterjal].
- [40] M. Naderi, Y. Khayat, Q. Shafiee, T. Dragicevic, H. Bevrani ja F. Blaabjerg, „Comprehensive small-signal modeling and Prony analysis-based validation of synchronous interconnected microgrids,“ *Energy Reports*, kd. 7, pp. 6677-6689, 2021.
- [41] B. W. H. A. Rupasinghe, „Simulation based methods to determine linear equivalent models of power system devices,“ University of Manitoba, Winnipeg, 2019.
- [42] V. Bokharaie, R. Sipahi ja F. Milano, „Small-Signal Stability Analysis of Delayed Power System Stabilizers,“ *2014 Power Systems Computation Conference*, Wroclaw, 2014.
- [43] R. A. DeCarlo. Stanislaw ja H. Žak, *A Quick Introduction to Sliding Mode Control and Its Applications*, 2008.
- [44] K. D. Young, V. I. Utkin ja Ü. Ozgüner, „A Control Engineer’s Guide to Sliding Mode Control,“ *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, kd. 7, nr 3, pp. 328-342, 1999.
- [45] A. T. Bahill, „A simple adaptive Smith-predictor for controlling time-delay systems: A tutorial,“ *IEEE Control Systems Magazine*, kd. 3, nr 2, pp. 16 - 22, 1983.
- [46] A. Engler, „Applicability of droops in low voltage grids,“ *DER Journal*, kd. 1, 2005.

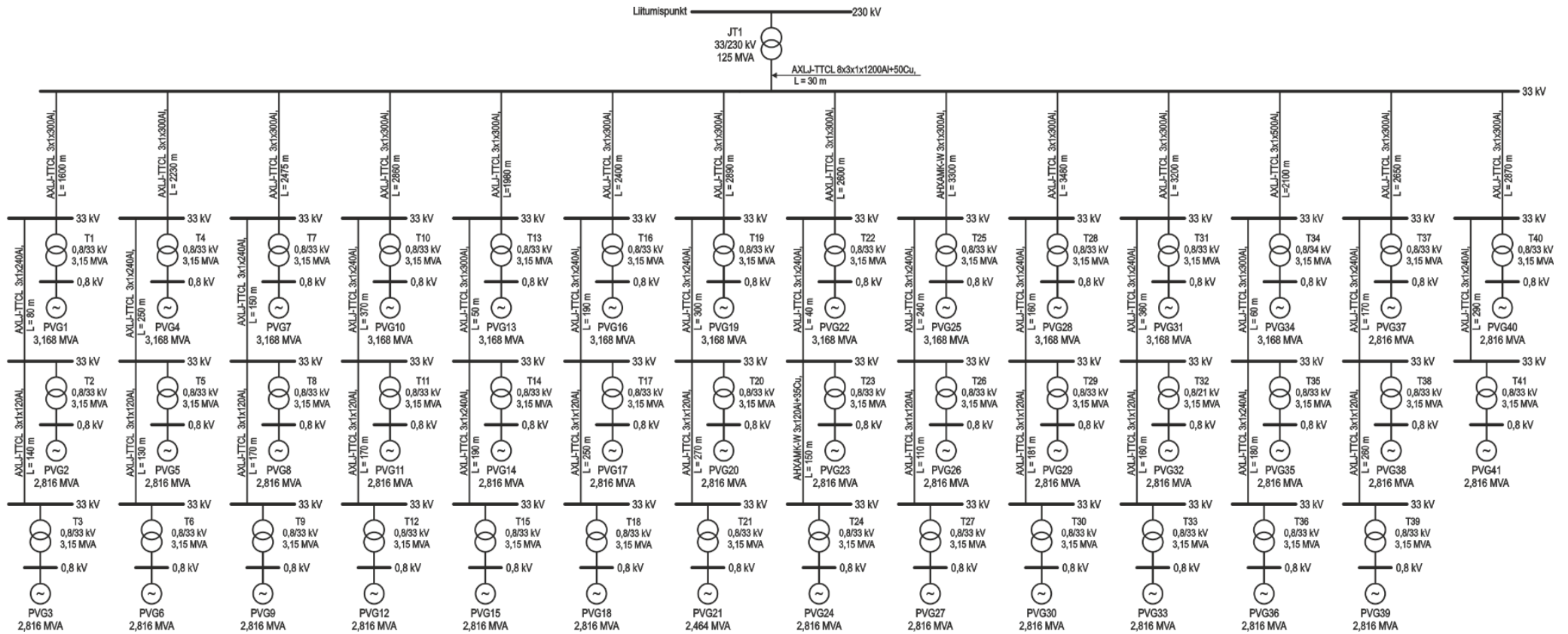
LISAD

Lisa 1. RSCAD mudeli skeem



Joonis L1. Reaalajasimulaatori mudeli elektriskeem

Lisa 2. Päikeselektrijaama skeem



Joonis L2. Päikeselektrijaama elektripaigaldise põhimõtteskeem

Lisa 3. RSCAD kasutajaliides



Joonis L3. Reaalajasimulaatori kasutajaliidese mõõdikud