



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Jussi Koskivirta

SIIRTOFUNKTION MUODOSTAMINEN
JA PARAMETRIEN MATEMAATTINEN
OPTIMOINTI

Tekniikka
2022

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Jussi Koskivirta
Opinnäytetyön nimi	Siirtofunktion muodostaminen ja parametrien matemaattinen optimointi
Vuosi	2022
Kieli	suomi
Sivumäärä	45
Ohjaaja	Mikko Västi

Tässä opinnäytetyössä tavoitteena oli muodostaa säätöpiiristä siirtofunktio ja luoda laskentatyökalu säätöpiirin parametrien optimoimiseksi, jotta säätöpiirin toiminta täyttää sille asetetut vaatimukset. Parametrien optimoinnin lisäksi laskentatyökalun tuli havainnollistaa siirtofunktion taajuusvaste piirtämällä vaihe- ja itseisarvovasteiden kuvaajat. Opinnäytetyön toimeksiantaja on VEO Oy.

Työssä tutustuttiin ensin tutkittavaan säätöpiiriin ja matemaattisiin menetelmiin, joita tarvitaan siirtofunktion muodostamiseen ja parametrien optimointiin. Tämän jälkeen siirtofunktio muodostettiin ja sen parametrien optimointia varten luotiin laskentatyökalu Microsoft Exceliin. Laskentatyökalua testattiin vertaamalla sillä saatuja tuloksia kahden aiemmin toteutetun säätöpiirin laskettuihin arvoihin, jotka oli saatu kantaverkkoyhtiö Fingridiltä.

Laskentatyökalulla optimoitujen parametrien muodostaman taajuusvasteen havaittiin olevan osittain parempi, kun sitä verrattiin säätöpiirien todellisiin käytössä olevien parametrien muodostamaan taajuusvasteeseen. Tulosten perusteella laskentatyökalun toimivuus todennettiin. Tulevaisuudessa VEO tulee käyttämään laskentatyökalua uusien säätöpiirien optimointiin.

ABSTRACT

Author	Jussi Koskivirta
Title	Forming of Transfer Function and Mathematical Optimization of the Parameters
Year	2022
Language	Finnish
Pages	45
Name of Supervisor	Mikko Västi

The objective of the thesis was to form a transfer function from a control circuit and to create a calculation tool for optimizing the parameters of the transfer function. Parameter optimization is required to verify that the control circuit operation meets the requirements. In addition, the calculation tool should also demonstrate the frequency response of the transfer function by plotting the Bode phase plot and the Bode magnitude plot. The thesis was commissioned by VEO Oy.

In the beginning the control circuit and mathematical methods required to form a transfer function and to perform parameters optimization were studied. The next step was to form the transfer function. The calculation tool for optimizing the transfer function parameters was created with Microsoft Excel. The calculation tool was tested by comparing the obtained results with actual calculated values received from Fingrid, the operator of the Finland's electrical transmission network.

It was observed that the modelled frequency response of the parameters optimized by the calculation tool was partially better when compared with the actual parameters of the modelled frequency response of the control circuit. Based on these results the validity of the calculation tool was verified. In the future VEO is planning to use the calculation tool to optimize new control circuits.

Keywords	Transfer function, frequency response, control engineering and flow charts
----------	--

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVALUETTELO

TAULUKKOLUETTELO

LIITELUETTELO

1	JOHDANTO	9
1.1	Työn tausta, tavoitteet ja sisältö.....	9
1.2	VEO Oy	10
2	SIIRTOFUNKTIO.....	11
2.1	Laplace-muunnos	11
2.2	Määritelmä.....	13
2.3	Lohkokaavioalgebra	14
2.3.1	Sarjakytkentä	14
2.3.2	Rinnankytkentä.....	15
2.3.3	Takaisinkytkentä.....	16
2.4	Bode-diagrammi.....	17
3	MATEMAATTINEN OPTIMOINTI.....	19
3.1	Optimointimenetelmiä.....	19
3.2	Geneettinen Algoritmi.....	20
3.3	Kustannusfunktio	21
4	TUTKITTAVA SIIRTOFUNKTIO	23
4.1	Tutkittavan järjestelmän esittely	23
4.2	Siirtofunktion muodostaminen.....	24
4.3	Siirtofunktion toiminnalle määritetyt vaatimukset	25
4.3.1	Vaihesiirto	26
4.3.1	Vahvistus.....	26
4.3.2	Muut.....	26
5	SIIRTOFUNKTION PARAMETRIEN MATEMAATTINEN OPTIMOINTI	
	28	
5.1	Kustannusfunktion määrittely.....	28
5.2	Optimoitavat parametrit.....	28

5.3	Rajoitteet parametreille	29
5.4	Ohjeistus optimointiin työkalulla.....	30
6	OPTIMOINTITYÖKALUN TESTAAMINEN.....	31
6.1	Benchmark 1	32
6.1.1	Tulokset alkuperäisillä arvoilla	32
6.1.2	Tulokset PSS2B.....	34
6.1.3	Tulokset PSS2C.....	35
6.1.4	Yhteenveto.....	36
6.2	Benchmark 2	37
6.2.1	Tulokset alkuperäisillä arvoilla	37
6.2.2	Tulokset PSS2B.....	39
6.2.3	Tulokset PSS2C.....	40
6.2.4	Yhteenveto.....	41
7	YHTEENVETO	42
	LÄHTEET	44

KUVALUETTELO

Kuva 1. Vuokaavio Laplace-muunnoksen hyödyntämisestä differentiaaliyhtälön ratkaisemisessa.	12
Kuva 2. Lineaarisen järjestelmän lohkokaavio.	13
Kuva 3. Sarjaan kytketyt lohkot.	14
Kuva 4. Rinnankytketyt lohkot	15
Kuva 5. Lohkojen takaisinkytkentä.	16
Kuva 6. Alipäästösuodattimen itseisarvovaste (vahvistus).	18
Kuva 7. Alipäästösuodattaminen vaihevaste.	18
Kuva 8. Paikallinen ja globaali minimi.	20
Kuva 9. Esimerkki geneettisen algoritmin toimintaperiaatteesta.	21
Kuva 10. IEEE PSS2C lisästabiloinnin lohkokaavio.	23
Kuva 11. IEEE PSS2C lisästabiloinnin lohkokaavio lisätyillä apumerkinnöillä.	25
Kuva 12. Vuokaavio PSS:n parametrien virityksestä laskentatyökalulla	30
Kuva 13. Alkuperäinen vaihesiirto, Fingrid, benchmark 1.	33
Kuva 14. Alkuperäinen vaihesiirto, laskentatyökalu, benchmark 1.	33
Kuva 15. Vaihesiirron kompensointi, PSS2B, benchmark 1.	34
Kuva 16. Vaihesiirron kompensointi, PSS2C, benchmark 1.	35
Kuva 17. Alkuperäinen vaihesiirto, Fingrid, benchmark 2.	38
Kuva 18. Alkuperäinen vaihesiirto, laskentatyökalu, benchmark 2.	38
Kuva 19. Vaihesiirron kompensointi, PSS2B, benchmark 2.	39
Kuva 20. Vaihesiirron kompensointi, PSS2C, benchmark 2.	40

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1. Optimoitavat ja käsin aseteltavat parametrit.	29
Taulukko 2. Alkuarvot, benchmark 1.	32
Taulukko 3. Taajuusvastekokeen mittausdata, benchmark 1.	32
Taulukko 4. Viritetyt parametrit, PSS2B, benchmark 1.	34
Taulukko 5. Viritetyt parametrit, PSS2C, benchmark 1.	35
Taulukko 6. Kustannusfunktioiden arvojen vertailu, benchmark 1.	36
Taulukko 7. Alkuarvot, benchmark 2.	37
Taulukko 8. Taajuusvastekokeen mittausdata, benchmark 2.	37
Taulukko 9. Viritetyt parametrit, PSS2B, benchmark 2.	39
Taulukko 10. Viritetyt parametrit, PSS2C, benchmark 2.	40
Taulukko 11. Kustannusfunktioiden arvojen vertailu, benchmark 2.	41

LIITELUETTELO**LIITE 1.** Lisästabilointipiirin virityksen laskentatyökalu

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta, tavoitteet ja sisältö

Lineaaristen ajasta riippumattomien järjestelmien käyttäytymistä voidaan tutkia muodostamalla järjestelmästä siirtofunktio, joka mallintaa järjestelmän lähdön (vaste) ja tulon (syöte) suhdetta. Opinnäytetyössä käsiteltävä järjestelmä on tahtigeneraattorin jännitesäätäjän lisästabilointipiiri PSS2C (Power System Stabilizer). Jännitesäätäjä on osa tahtigeneraattorin magnetointijärjestelmää. Työn toimeksiantaja VEO Oy toteuttaa tahtigeneraattoreiden magnetointiin liittyviä projekteja, joissa edellytetään lisästabilointipiirin taajuusvasteen ennakkomallinnusta ja parametrien viritystä ennen käyttöönottoa. Opinnäytetyön tavoitteena oli muodostaa säätöpiirin lohkokaaviosta siirtofunktio ja luoda laskentatyökalu säätöpiirin parametrien optimointiin, jotta säätöpiirin toimintaa koskevat vaatimukset täytyvät. Parametrien optimoinnin lisäksi laskentatyökalun tuli havainnollistaa siirtofunktion taajuusvaste piirtämällä vaihe- ja itseisarvovasteiden kuvaajat.

Teoriaosuudessa käsitellään lyhyesti Laplace-muunnos, siirtofunktion määritelmä, lohkokaavioiden algebralliset toimenpiteet, sekä Bode-diagrammi. Luvussa 3 esitellään muutamaa matemaattisen optimoinnin eri menetelmää. Teoriaosuuden jälkeen tutustutaan PSS2C:n lohkokaavioon, muodostetaan siitä siirtofunktio ja käydään läpi Fingridin asettamia rajoitteita PSS:n toiminnalle. Seuraavassa vaiheessa selostetaan parametrien optimointia Microsoft Exceliin luodulla laskentatyökalulla. Lopuksi laskentatyökalun luotettavuutta arvioidaan vertaamalla työkalulla optimoitujen parametrien arvoja kahden todellisen säätöpiirin arvoihin, jotka on saatu Fingridiltä.

1.2 VEO Oy

VEO Oy, alkuperäiseltä nimeltään Vaasa Engineering Oy, on vuonna 1989 Vaasassa perustettu yritys, joka harjoittaa sähköalan projektiliiketoimintaa. Yhtiön päätoimipiste ja kojeistotehdas sijaitsevat Vaasan Runsorissa. Suomen muut toimipisteet sijaitsevat Seinäjoella, Rovaniemellä ja Paimiossa. VEOlla on myös tytäryhtiöt Ruotsissa, Norjassa ja Yhdistyneessä kuningaskunnassa. Konsernin liikevaihto vuonna 2020 oli noin 120 miljoonaa euroa ja yhtiö työllisti tytäryhtiöt mukaan lukien 485 henkilöä.¹

VEOlla on kolme pääosastoa, jotka tarjoavat erilaisia sähkö- ja automaattioratkaisuja eri toimialoille: Power Generation (voimalaitokset), Power Distribution (sähköasemat) ja Power Utilisation (teollisuus ja laivat). Pien- ja keskijännitetelekojeistoja valmistava kojeistotehdas on osana eri osastojen projektiliiketoimintaa.

¹ VEO Oy. 2022.

2 SIIRTOFUNKTIO

2.1 Laplace-muunnos

Laplace-muunnos on yksi yleisimmin käytetyistä integraalimuunnoksista. Funktion $f(t)$ Laplace-muunnos $F(s)$ määritetään seuraavasti:

$$F(s) = \mathcal{L}[f(t)] = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (1)$$

Yhtälössä 1 muuttuja t (yleensä aika) on reaaliluku ja muuttuja s on kompleksiluku:

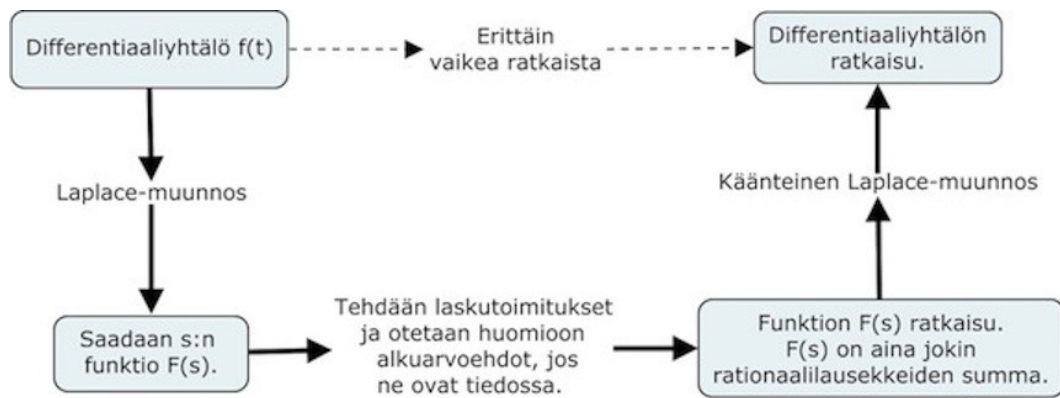
$$s = \sigma \pm j\omega \quad (2)$$

missä σ ja ω (yleensä kulmataajuus) ovat reaalilukuja.² Pysyvän tilan signaaleilla muuttujan s reaaliosa $\sigma = 0$ ja muutostilan signaaleilla $\sigma \neq 0$. Tässä työssä käsitellään vain pysyvän tilan signaaleja, joilla $s = j\omega$.

Laplace-muunnosta voidaan käyttää differentiaaliyhtälöiden ratkaisemiseen, koska muunnoksen avulla differentiaaliyhtälö muuttuu algebralliseksi yhtälöksi, jonka ratkaiseminen on yleensä yksinkertaisempaa kuin differentiaaliyhtälön ratkaiseminen. Ratkaistu funktio $F(s)$ voidaan käänteisellä Laplace-muunnoksella muuntaa takaisin muuttujan t funktioksi f , joka on differentiaaliyhtälön ratkaisu. Prosessi on havainnollistettu kuvassa 1.³

² Smith, J. O. 2007.

³ Heino, R. 2014. s. 2

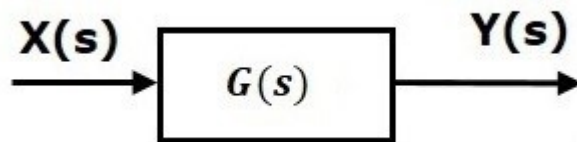


Kuva 1. Vuokaavio Laplace-muunnoksen hyödyntämisestä differentiaaliyhtälön ratkaisemisessa⁴.

⁴ Heino, R. 2014. s. 3

2.2 Määritelmä

Siirtofunktio on matemaattinen funktio, joka mallintaa järjestelmän lähdön (vaste) ja tulon (syöte) suhdetta. Lineaarille ajasta riippumattoman järjestelmälle on Laplace-muunnoksen avulla mahdollista muodostaa muuntosuhde, joka kuvaa lähtösignaalin muutosta suhteessa tulosignaaliin. Määritelmän mukaan siirtofunktio on lähtösignaalin Laplace-muunnos jaettuna tulosignaalin Laplace-muunnoksella, kun oletetaan, että jokaisen muuttujan arvo on nolla lähtötilanteessa. Kuvassa 2 on esitetty lineaarisen järjestelmän lohkokaavio.⁵



Kuva 2. Lineaarisen järjestelmän lohkokaavio⁶.

Lohkokaavio voidaan esittää algebrallisena yhtälönä

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (3)$$

Missä $G(s)$ = siirtofunktio

$X(s)$ = tulosignaali

$Y(s)$ = lähtösignaali

⁵ Lewis, P. H., Yang, C. 1997. s. 50-51

⁶ Lewis, P. H., Yang, C. 1997. s. 51

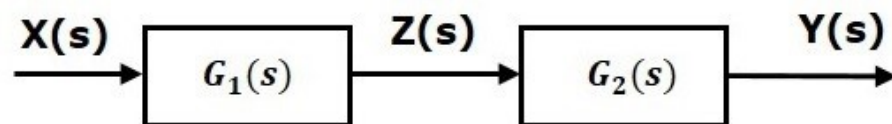
2.3 Lohkokaavioalgebra

Lohkokaavio on graafinen esitys algebrallisista suhteista ja se on siirtofunktion ohella tärkeä työkalu järjestelmien käyttäytymisen tutkimisessa. Lohkokaavion avulla järjestelmän toiminnalliset ominaisuudet on mahdollista havainnollistaa nopeasti. Yksittäisten lohkojen ja alijärjestelmien toimintaa voidaan tarkastella erikseen ja myös sitä, miten yksittäisen lohkon toiminta vaikuttaa koko järjestelmään.⁷

Tässä luvussa esitellään yleisimmät lohkokaavioihin liittyvät algebralliset toimenpiteet, joiden avulla siirtofunktion lohkokaavio saadaan muunnettua algebralliseksi esitykseksi. Luvussa ei esitetä kaikkia olemassa olevia toimenpiteitä.

2.3.1 Sarjakytkentä

Kuvassa 3 on esitetty lohkojen sarjakytkentä, jota kutsutaan myös kaskadikytkennäksi.



Kuva 3. Sarjaan kytketyt lohkot⁸.

Siirtofunktion määritelmää soveltamalla muodostetaan yhtälöt sarjakytkennän lähtösignaalille $Y(s)$ ja signaalille $Z(s)$:

$$Y(s) = Z(s)G_2(s) \quad (4)$$

$$Z(s) = X(s)G_1(s) \quad (5)$$

⁷ Lewis, P. H., Yang, C. 1997. s. 53

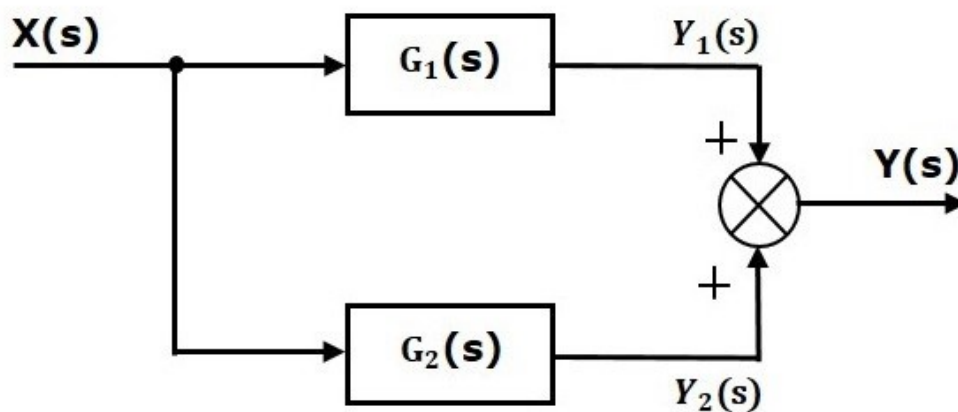
⁸ Tutorialspoint. 2022 a.

Kun yhtälö 5 sijoitetaan yhtälöön 4 ja saatu yhtälö sievennetään, havaitaan, että sarjaan kytkettyjen lohkojen siirtofunktio vastaa lohkojen kertolaskua:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = G_1(s)G_2(s) \quad (6)$$

2.3.2 Rinnankytkentä

Rinnankytketyillä lohkoilla on sama tulossignaali.



Kuva 4. Rinnankytketyt lohkot⁹

Muodostetaan kuvan 4 lohkokaaaviosta yhtälöt 7 -9:

$$Y(s) = Y_1(s) + Y_2(s) \quad (7)$$

$$Y_1(s) = X(s)G_1(s) \quad (8)$$

$$Y_2(s) = X(s)G_2(s) \quad (9)$$

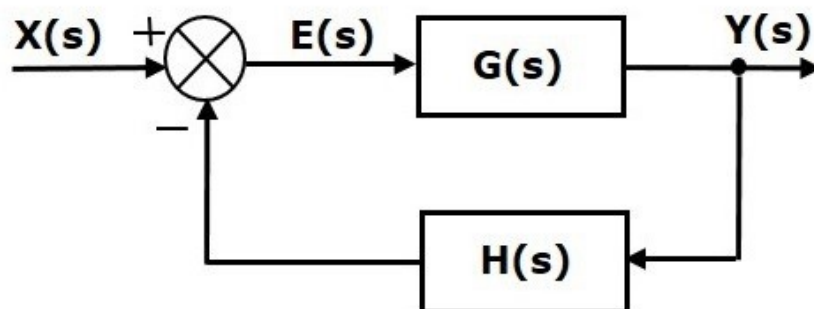
Summauslohkoon voi myös tulla haaroja, joiden etumerkki on negatiivinen, mutta tässä esimerkissä molemmat haarat ovat positiivisia. Rinnankytkettyjen lohkojen sievennetyn siirtofunktion yhtälö on seuraava:

⁹ Tutorialspoint. 2022 a.

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = G_1(s) + G_2(s) \quad (10)$$

2.3.3 Takaisinkytkentä

Takaisinkytkennässä lähtösignaali muodostaa silmukan, joka vaikuttaa lähtösignaalin muodostukseen. Takaisinkytkentä voi olla positiivinen tai negatiivinen, ja takaisinkytkentäsilmukka itsessään saattaa myös sisältää lohkoja.



Kuva 5. Lohkojen takaisinkytkentä¹⁰.

Muodostetaan yhtälöt kuvan 5 takaisinkytkennän lohkokaaaviosta

$$Y(s) = E(s)G(s) \quad (11)$$

$$E(s) = X(s) - H(s)Y(s) \quad (12)$$

ja sijoitetaan yhtälö 12 yhtälöön 11. Sievennysten jälkeen esimerkin negatiivisen takaisinkytkennän siirtofunktio on seuraava:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (13)$$

Positiivisessa takaisinkytkennässä yhtälön 13 oikean puolen nimittäjässä oleva summaus vaihtuu vähennyslaskuksi. Mikäli esimerkin takaisinkytkentäsilmukka ei

¹⁰ Tutorialspoint. 2022 a.

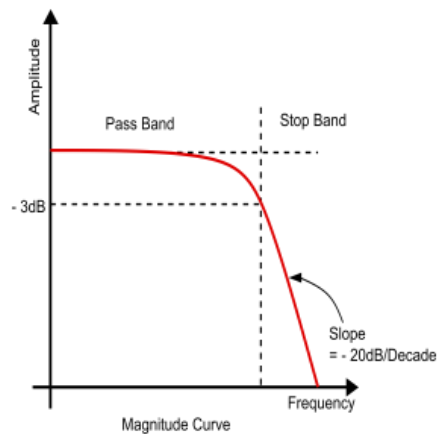
sisältäisi lohkoa $H(s)$, jäisi se myös pois edellä mainitun nimittäjän kertolaskuterministä.

2.4 Bode-diagrammi

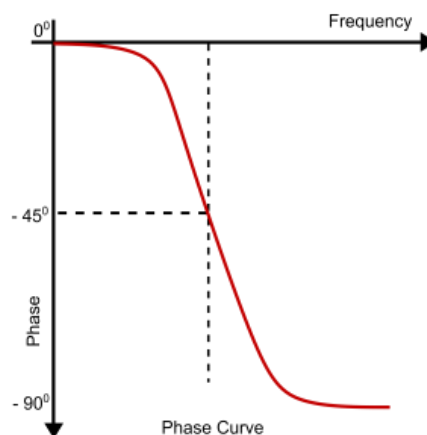
Bode-diagrammi havainnollistaa järjestelmien dynaamista käyttäytymistä taajuuden funktiona, eli se on taajuusvasteen graafinen esitystapa. Bode-diagrammi muodostuu yleensä kahdesta kuvaajasta, itseisarvovasteesta ja vaihevasteesta. Yleensä molemmat kuvaajat on piirretty logaritmiselle asteikolle, jossa x-akselilla on taajuus. Vaihevasteesta selviää järjestelmän tulo- ja lähtösignaalin välinen viive, vaihesiirto, joka määritetään tyypillisesti asteina tai radiaaneina. Itseisarvovaste havainnollistaa järjestelmässä tapahtuvaa signaalin vahvistusta taajuuden funktiona. Vahvistus ilmoitetaan yleensä desibeleinä.¹¹

Esimerkin Bode-diagrammista muodostavat kuvat 6 ja 7, jotka sisältävät alipäästösuodattimen (low-pass filter) itseisarvovasteen ja vaihevasteen kuvaajat.

¹¹ Wikipedia. 2018.



Kuva 6. Alipäästösuodattimen itseisarvovaste (vahvistus)¹².



Kuva 7. Alipäästösuodattimen vaihevaste¹³.

Koko järjestelmän kattava Bode-diagrammi voidaan tehdä vain yhden tulo- ja lähtösignaalin sisältävään järjestelmään (SISO, Single Input Single Output), koska useammalla tulo- ja/tai lähtösignaalilla koko järjestelmää kuvaaminen edellyttää kolmen tai useamman ulottuvuuden tason muodostamista. Vaihtoehtoisesti voidaan muodostaa useita eri kuvaajia jokaiselle eri signaalikombinaatiolle.

¹² Tutorialspoint. 2022 b.

¹³ Tutorialspoint. 2022 b.

3 MATEMAATTINEN OPTIMOINTI

Yksinkertaisimmillaan matemaattinen ongelma on mahdollista esittää maksimi- tai minimointiongelmana, jossa optimoinnilla pyritään etsimään funktion paikallista tai globaalia ääriarvoa¹⁴. Tässä työssä optimointia tarkastellaan paikallisen tai globaalin minimin näkökulmasta.

3.1 Optimointimenetelmiä

Erilaisia matemaattisia optimointimenetelmiä on olemassa lukuisia, mutta seuraava lista sisältää muutamia yleisimpiä kategorioita¹⁵:

1. Lineaaristen ongelmien ratkaisumenetelmät
2. Iteratiiviset menetelmät
3. Heuristiset menetelmät

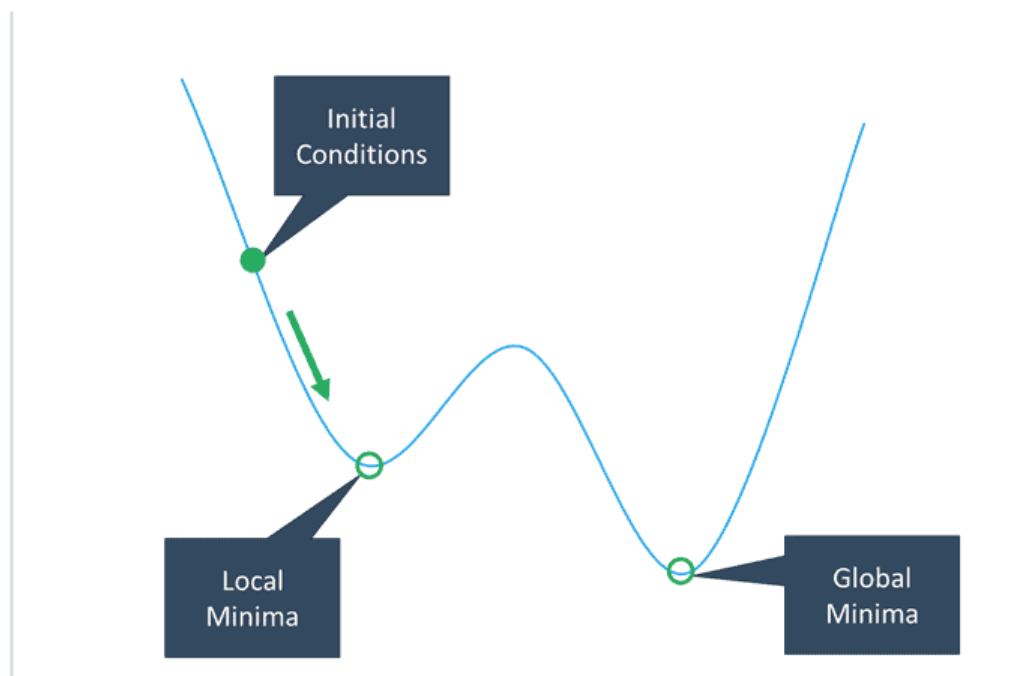
Yksittäisten algoritmien tarkka luokittelu on häilyvää, sillä monesti algoritmit hyödyntävät useiden eri kategorioiden metodeja.

Microsoft Excelin Solver-lisäosa sisältää kolme erilaista algoritmia. Simplex LP -algoritmia käytetään lineaaristen ongelmien ratkaisemiseen, joten se ei sovellu tähän työhön, koska käsiteltävä ongelma ei ole lineaarinen. GRG Nonlinear -algoritmi (Generalized Reduced Gradient) on iteratiivinen menetelmä, joka on melko riippuvainen alkuehdoista. Mikäli alkuehdot (initial conditions, **Kuva 8.**) osuvat lähelle paikallista minimiä, optimointialgoritmi ei todennäköisesti löydä globaalia minimiä. Evolutiivisella algoritmilla on paremmat mahdollisuudet löytää globaali minimi kuin Nonlinear GRG -algoritmilla. Satunnaisuuden kautta evolutiivisen algoritmin on mahdollista ”hypätä” paikallisen minimin yli ja löytää globaali minimi,

¹⁴ Wikipedia. 2020 b.

¹⁵ Wikipedia. 2020 b.

vaikka alkuehdot olisivatkin lähellä paikallista minimiä. Evoluutiivisen algoritmin luokittelun pääkategoria lukeutuu heuristisiin menetelmiin.



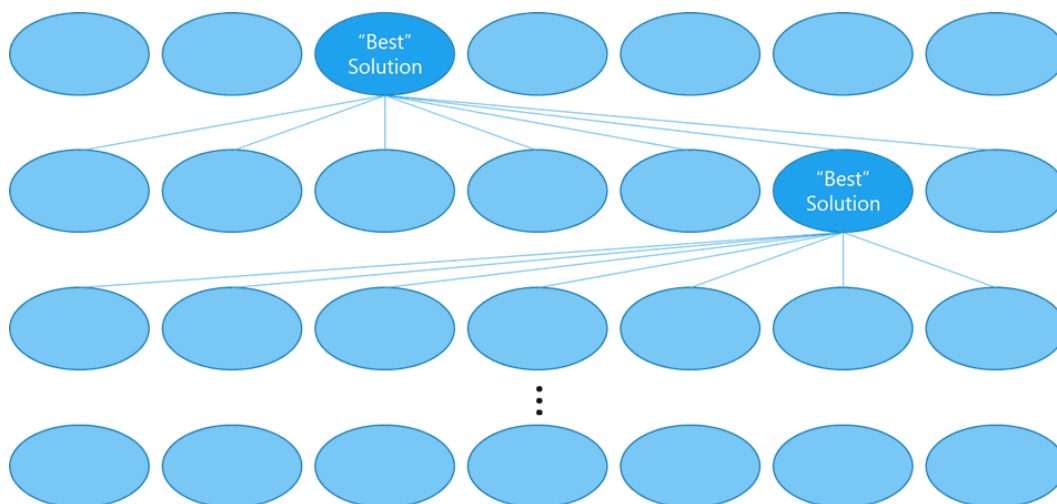
Kuva 8. Paikallinen ja globaali minimi¹⁶.

3.2 Geneettinen Algoritmi

Geneettinen algoritmi on kaikkein suosituin evoluutiivinen algoritmi. Evoluutiiviset algoritmit soveltavat matemaattisen optimointiongelman alkioihin yhtä tai useampaa biologisen evoluution mekanismia: lisääntymistä, mutaatioita, geneettistä rekombinaatiota ja luonnonvalintaa.¹⁷ Kuvassa 9 on havainnollistettu esimerkki mahdollisesta geneettisen algoritmin toimintaperiaatteesta.

¹⁶ EngineerExcel. 2022

¹⁷ Wikipedia. 2021.



Kuva 9. Esimerkki geneettisen algoritmin toimintaperiaatteesta¹⁸.

Ensimmäisten alkioden sukupolvi voidaan luoda arpomalla alkioita satunnaisesti tai käyttäjä voi määrittellä alkuehdot. Sitten algoritmi vertailee alkioita ja valitsee niistä parhaimmat alkioita (kuvassa 9 vain paras), minkä jälkeen seuraavien alkioden sukupolvi muodostetaan hyödyntämällä esimerkiksi mutaatioita ja alkioden rekombinaatioita. Muodostetusta sukupolvesta valitaan jälleen parhaimmat ja prosessia toistetaan, kunnes algoritmin toiminta pysäytetään. Lopetusehto voi olla esimerkiksi se, että optimoitu arvo ei ole parantunut merkittävästi enää hetkeen tai tietyn arvon saavuttaminen.

3.3 Kustannusfunktio

Kustannusfunktio (vaihtoehtoisia nimityksiä tappio- ja virhefunktio) on matemaattinen funktio, joka muodostaa reaaliluvun, yhden tai useamman muuttujan arvoille tai todennäköisyysteorian mukaiselle tapahtumalle. Muodostettu reaaliluku kuvaa muuttujien tai tapahtuman ”hintaa”. Matemaattisessa optimoinnissa tätä hintaa pyritään tyypillisesti minimoimaan. Neliöllisen kustannusfunktion käyttö on melko

¹⁸ EngineerExcel. 2022.

yleistä, sillä se on symmetrinen: itseisarvoltaan yhtä suuren positiivisen ja negatiivisen virheen hinta on sama.¹⁹

$$(x_{virhe})^2 = (-x_{virhe})^2 \quad (14)$$

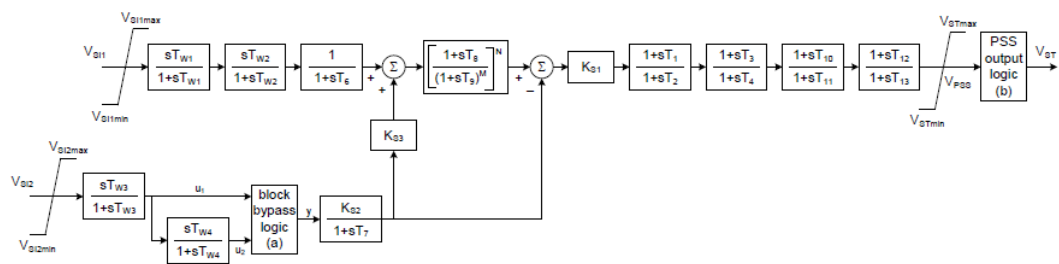
Neliöllinen virhe ohjaa myös optimointialgoritmia painottamaan suurten virheiden eliminointia, sillä virheen kasvaessa hinta nousee eksponentiaalisesti.

¹⁹ Wikipedia. 2022 a.

4 TUTKITTAVA SIIRTOFUNKTIO

4.1 Tutkittavan järjestelmän esittely

Työssä tutkittava järjestelmä on lisästabilointipiiri PSS2C (**Kuva 10**). Lisästabilointipiirillä vaimennetaan sähköjärjestelmässä esiintyviä tehoheilahteluja ja se on osa generaattorin jännitesäätiä. PSS2C sisältää kaksi tulosignaalia, joista ylempi (tulosignaali 1) on yleensä taajuus tai roottorin nopeus ja alempi (tulosignaali 2) on pätöteho. Kun tulosignaalina 1 on taajuus, mekaanisen muutoksen saaminen signaalista edellyttää laskennallista muunnosta. Kummankin tulosignaalin perässä olevilla washout-suodattimilla on erityisehto: Mikäli suodatinlohkon aikavakio on 0, lohko korvataan vahvistinlohkolla, jonka vahvistus on 1, eli käytännössä lohko ohitetaan.



Kuva 10. IEEE PSS2C lisästabiloinnin lohkoakaavio²⁰.

Missä V_{S11} = Tulosignaali 1

V_{S12} = Tulosignaali 2

V_{ST} = PSS:n lähtösignaali

K_{S1} = PSS:n vahvistus

K_{S2} = Tulosignaalin 2 vahvistus

K_{S3} = Tulosignaalin 2 toinen vahvistus

N, M = Ramp-tracking -suodattimen kokonaislukuvakiot

$T_1, T_2, T_3, T_4, T_{10}, T_{11}, T_{12}, T_{13}$ = Lead-lag suodattimien aikavakiot

²⁰ IEEE. 2016. s. 62

T_6 = Signaalimuuntimen 1 aikavakio (tulosaali 1)

T_7 = Signaalimuuntimen 2 aikavakio (tulosaali 2)

T_8, T_9 = Ramp-tracking -suodattimen aikavakiot

$T_{W1}, T_{W2}, T_{W3}, T_{W4}$ = Washout-suodattimien aikavakiot

4.2 Siirtofunktion muodostaminen

Lisästabiloitimpiirin käyttäytymistä voidaan havainnollistaa määrittämällä sen taajuusvaste ja luomalla siitä Bode-diagrammi. PSS2C sisältää kaksi tulosaalia, joten koko lisästabiloitimpiirin kattavaa Bode-diagrammia ei voida luoda suoraan. Heilahtelu-yhtälöstä (kaava 15) havaitaan, että generaattorin roottorin pyörimisnopeus ja teho korreloivat keskenään²¹. Tämän riippuvuuden ansiosta sähköinen teho voidaan johtaa taajuudesta/roottorin nopeudesta.

$$\frac{2HS_n}{\omega_{sm}} \frac{d\Delta\omega}{dt} = P_m - P_e = P_{acc} \rightarrow \frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{2H} (P_m - P_e) \quad (15)$$

Missä H = inertia vakio (yksikkö MWh/MVA)

S_n = generaattorin nimellisteho

ω_{sm} = generaattorin roottorin synkroninopeus

$\Delta\omega$ = pyörimisnopeuden muutos

P_m = mekaaninen teho

P_e = sähköteho

P_{acc} = kiihdyttävä teho

Stabiilissa tilanteessa mekaaninen teho P_m ja sähköteho P_e ovat yhtä suuria, jolloin kiihdyttävä teho $P_{acc} = 0$ ja roottori pyörii synkroninopeudella. Yhtälöstä 15 ratkaistaan pyörimisnopeuden muutos $\Delta\omega$:

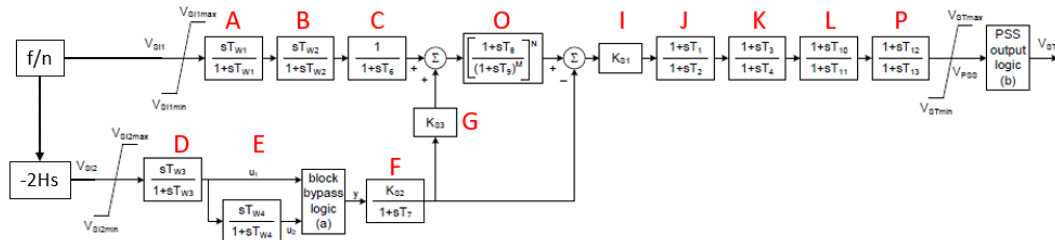
$$\Delta\omega = \frac{1}{2H} \int (\Delta P_m - \Delta P_e) dt \quad (16)$$

²¹ Hammer, A. 2011. s. 17

Lyhytaikaisessa tilanteessa voidaan olettaa, että mekaanisen tehon muutos $\Delta P_m = 0$, sillä sähköisen tehon muutos tapahtuu millisekunneissa, mutta mekaanisen tehon muutos sekunneissa. Kun yhtälöön 16 sovelletaan integraalin Laplace-muunnosta ja oletusta $\Delta P_m = 0$, saadaan ratkaistua lyhytaikainen sähköisen tehon muutos:

$$\Delta P_e = -2Hs \cdot \Delta \omega \quad (17)$$

Sievennettyä yhtälöä 17 soveltamalla kahden tulosignaalin järjestelmä muuttuu yhden tulosignaalin järjestelmäksi, mikä mahdollistaa taajuusvasteen laskemisen ja Bode-diagrammin luomisen koko lisästabilointipiiristä. Laskenta edellyttää siirtofunktion lausekkeen muodostamista kuvan 10 lohkokaaviosta. Lauseke tulee olemaan melko pitkä lohkojen suuren lukumäärän vuoksi, joten yksittäisiä lohkoja merkitään kirjaimilla. Lohkojen kirjaintunnukset ja yhtälön 17 taajuuden/roottorin nopeuden kertominen termillä $-2Hs$ on esitetty muokatussa PSS2C lohkokaaviossa kuvassa 11.



Kuva 11. IEEE PSS2C lisästabiloinnin lohkokaavio²² lisätyillä apumerkinnöillä.

Lauseke muodostetaan luvun 2.3 lohkokaavioalgebran toimenpiteillä:

$$\left((A(s)B(s)C(s) + G(-2HsD(s)E(s)F(s)))O(s) - (-2HsD(s)E(s)F(s)) \right) IJ(s)K(s)L(s)P(s) \quad (18)$$

4.3 Siirtofunktion toiminnalle määritetyt vaatimukset

Kaikkien Suomen sähköjärjestelmään liitettäviä nimellisteholtaan yli 0,8 kW voimalaitosten tulee täyttää Fingridin asettamat voimalaitosten järjestelmätekniset

²² IEEE. 2016. s. 62

vaatimukset (VJV). Vaatimukset perustuvat eurooppalaiseen verkkosäätöön (Euroopan komission asetus 2016/631), johon Fingrid on tehnyt kansalliset lisäykset ja täsmennykset. VJV:n liite C käsittelee lisästabilointipiireille asetettuja vaatimuksia.²³

4.3.1 Vaihesiirto

Vaihesiirto mitataan tekemällä taajuusvastekoe matalalla generaattorin teholla lisästabilointipiirin ollessa pois päältä. Taajuusvastekoe suoritetaan 0,2 – 3,0 Hz taajuusalueella esimerkiksi kymmenellä eri taajuudella. Lisästabilointipiirin vaihesiirron kompensoinnin on oltava ± 30 astetta mitatusta vaihesiirrosta 0,2 – 2,0 Hz taajuusalueella.²⁴

4.3.1 Vahvistus

Vaihesiirtoa viritettäessä on varmistettava, ettei matalataajuisien (alle 0,1 Hz) signaalien vahvistus ole suurempi kuin taajuusalueen 0,2 – 2,0 Hz vahvistus. Vaatimuksen suhteen on joissain tapauksissa tehtävä kompromissi, jos vaihesiirron ehtoa ei muuten voida täyttää. Lisästabilointipiirin kokonaisvahvistus viritetään käyttöönoton yhteydessä tehtävillä kokeilla.²⁵

4.3.2 Muut

Yhdenkään siirtofunktion lopussa olevien lead-lag -suodatinlohkojen (J, K, L, P) sisäisten aikavakioiden jakosuhte (T1/T2, T3/T4, T10/T10, T12/T13) ei saa olla yli 15, koska tällöin yksittäisen lohkon vaihesiirto olisi yli 60 astetta. Yksittäisen suodatinlohkon vaihesiirto ei saa olla yli 60°.

Siirtofunktion alussa olevat washout-suodattimien aikavakioiden (T_{W1} - T_{W4}) suositellaan olevan alle 10 s, eli käytännössä 6 – 10 s, jotta matalataajuiset häiriöt

²³ Fingrid. 2018. s. 5, 9, 108

²⁴ Fingrid. 2018. s. 111-112

²⁵ Fingrid. 2018. s. 112

saadaan suodatettua pois mahdollisimman nopeasti PSS:n ulostulosta.²⁶ Tyypillisesti aikavakiot T_{W1} - T_{W4} ovat samansuuruisia.

²⁶ Fingrid. 2018. s. 111

5 SIIRTOFUNKTION PARAMETRIEN MATEMAATTINEN OPTIMOINTI

5.1 Kustannusfunktion määrittely

Laskentatyökalun kustannusfunktion arvo ilmaisee, että miten hyvin siirtofunktion parametrit on viritetty. Mitä pienempi arvo, sitä parempi viritys. Laskentatyökalun kustannusfunktio määreytyy seuraavasti:

- $f(x) = (x_{mit} - x)^2$, jos arvo on rajojen ($\pm 30^\circ$ mitatusta vasteesta) sisällä
- $f(x) = iso\ luku$, jos arvo on rajojen ulkopuolella

Kustannusfunktion arvoa korjataan painokertoimilla, joita sovelletaan kahdella eri tavalla²⁷:

1. Taajuuden funktiona, jossa oletuksena taajuusaluetta 0,3 – 1,0 Hz painotetaan enemmän.
2. Yli- tai alikompensointi, joista oletuksena painotetaan alikompensointia.

5.2 Optimoitavat parametrit

Optimoitavat ja käsin aseteltavat parametrit on eritelty taulukossa 1. Parametrit T_{W1} - T_{W4} on merkitty tähdellä, koska niitä ei optimoida erikseen, vaan oletuksena niille kopioidaan parametrin T_7 arvo. Parametri K_{S2} on merkitty kahdella tähdellä, koska optimoinnin sijaan se määritetään kaavalla 19.

$$K_{S2} = \frac{T_7}{2H} \quad (19)$$

²⁷ Fingrid. 2018. s. 112

Taulukko 1. Optimoitavat ja käsin aseteltavat parametrit.

Optimoitavat	Yksikkö		Käsin aseteltavat	Yksikkö
Tw1*	[s]		H	[s]
Tw2*	[s]		Ks1	[pu]
Tw3*	[s]		Ks3	[pu]
Tw4*	[s]		T9	[s]
Ks2**	[pu]		M	[s]
T7	[s]		N	[s]
T8	[s]			
Ts1	[s]			
Ts2	[s]			
Ts3	[s]			
Ts4	[s]			
Ts10	[s]			
Ts11	[s]			
T6	[s]			
Ts12	[s]			
Ts13	[s]			

5.3 Rajoitteet parametreille

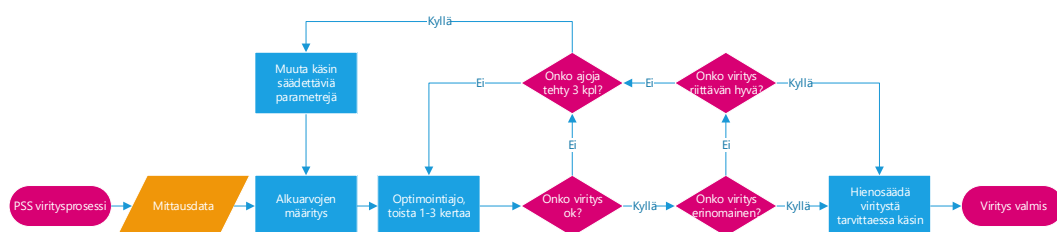
Luvun 4.3 lisäksi optimoitaville parametreille on lisättävä muutamia käytännön rajoitteita. Yhdenkään optimoitavan parametrin arvo ei saa olla negatiivinen. Aikavakiolla tapauksessa negatiivinen arvo tarkoittaisi sitä, että reagoinnin sijaan stabiointipiirin tulisi ennustaa tulosignaalin häiriöt, mikä ei ole mahdollista. Lead-lag-suodattimien aikavakioille T_{S2} , T_{S4} , T_{S11} ja T_{S13} on asetettu minimiarvo 0,0005, jotta vältytään nolllalla jakamiselta, kun tarkistetaan että lead-lag-suodattimien aikavakioiden jakosuhde on alle 15.

Käytännön kokemusten perusteella aikavakioille T_6 ja lead-lag-suodattimien aikavakioille on annettu maksimiarvoksi 1, sillä laskentatyökalun optimointialgoritmi saattaa muutoin harhautua tarkastelemaan paikallista minimiä hyvinkin suurilla aikavakioiden arvoilla. Lisäksi ramp tracking -suodattimen aikavakioille T_8 on asetettu seuraava ehto: $0,2 \leq T_8 \leq 0,5$ s.

5.4 Ohjeistus optimointiin työkalulla

Optimointi aloitetaan syöttämällä työkaluun generaattorin taajuusvastekokeen mitausdata ja generaattorin inertiaavakion H . Muille parametreille syötetään alkuarviot vakioehdotuksen perusteella tai käyttäjän oman määritelmän mukaan. Jos lisästabilointipiiriksi on valittu PSS2C:n sijasta PSS2B, aikavakiot T_{S12} ja T_{S13} asetetaan arvoon 1 ja poistetaan optimoitavien parametrien listasta ennen optimoinnin aloitusta.

Optimoinnissa käytetään Evolutionary-algoritmia ja sillä tehdään 1 – 3 ajoa käyttäen edellisen ajon parametrien arvoja seuraavan lähtöarvoina. Ajon onnistumista voidaan arvioida kustannusfunktion arvon perusteella. Tulos on sitä parempi, mitä pienempään kustannusfunktion arvoon algoritmi päättyy. Jos arvo on alle miljoonan, optimointi on alustavasi ok ja todennäköisesti parametrit täyttävät VJV-vaatimukset. Optimointi on loistava, mikäli kustannusfunktion arvo on alle tuhat. Mikäli kolmaskaan ajo ei tuota haluttua tulosta, kokonaislukuparametrin M arvoa vähennetään yhdellä ja ajot toistetaan. PSS:n parametrien viritysprosessi laskentatyökalulla on havainnollistettu kuvan 12 vuokaaviossa.



Kuva 12. Vuokaavio PSS:n parametrien virityksestä laskentatyökalulla

6 OPTIMOINTITYÖKALUN TESTAAMINEN

Optimointityökalun testauksessa keskityttiin seuraaviin kolmeen kysymykseen:

1. Piirtääkö työkalu siirtofunktion Bode-diagrammin oikein annetuilla lähtöarvoilla?
2. Saadaanko työkalulla optimoitua siirtofunktion parametrit käyttäen PSS2B-siirtofunktiota?
3. Saadaanko työkalulla optimoitua siirtofunktion parametrit käyttäen PSS2C-siirtofunktiota?

Laskentatyökalua testataan kahdella eri vesivoimalaitoksen generaattorilla, joiden tiedot on saatu Fingridiltä²⁸. Työkalun toimintaa on mahdollista arvioida vertaamalla Fingridin kuvaajia laskentatyökalun kuvaajiin, kun käytössä on samat parametrit. Tulosten perusteella on myös mahdollista vertailla, että kummalla lisästabiilointipiirillä (PSS2B/PSS2C) saadaan parempi taajuusvaste.

²⁸ Linnamaa, L. 2022.

6.1 Benchmark 1

6.1.1 Tulokset alkuperäisillä arvoilla

Benchmark 1:n annetut alkuperäiset parametrit on listattu taulukossa 2.

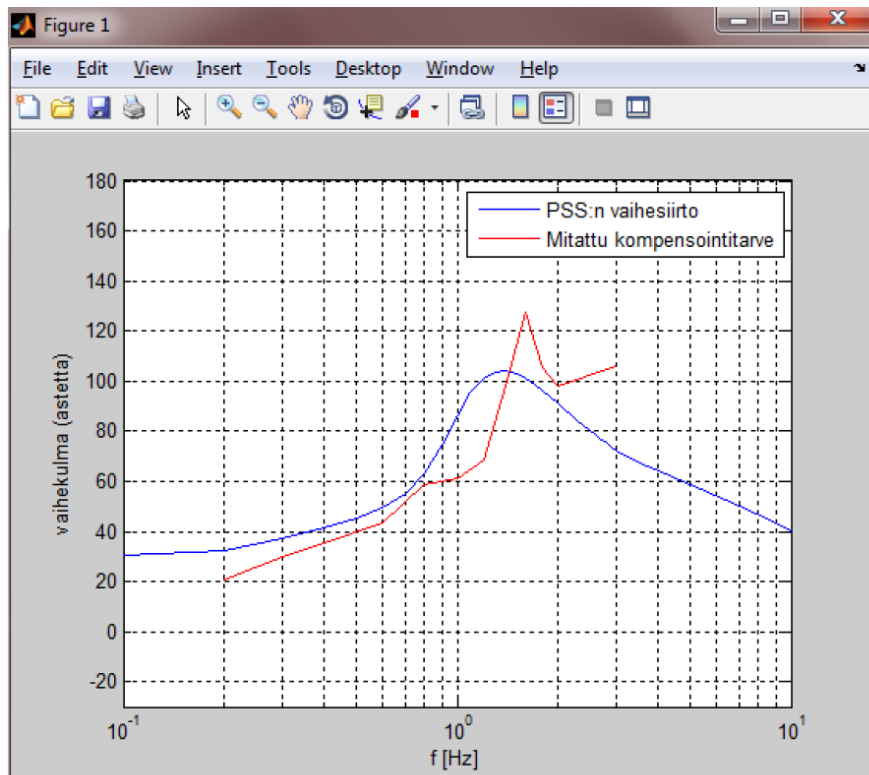
Taulukko 2. Alkuarvot, benchmark 1.

Parametrin nimi	Alkuarvo
H	2,32
Tw1	10
Tw2	10
Tw3	10
Tw4	10
T6	0,05
T7	10
T8	0,5
T9	0,1
Ks1	1
Ks2	2,155
Ks3	1
M	5
N	1
T1	0,12
T2	0,02
T3	0,4
T4	0,08
T10	1
T11	1
T12	1
T13	1

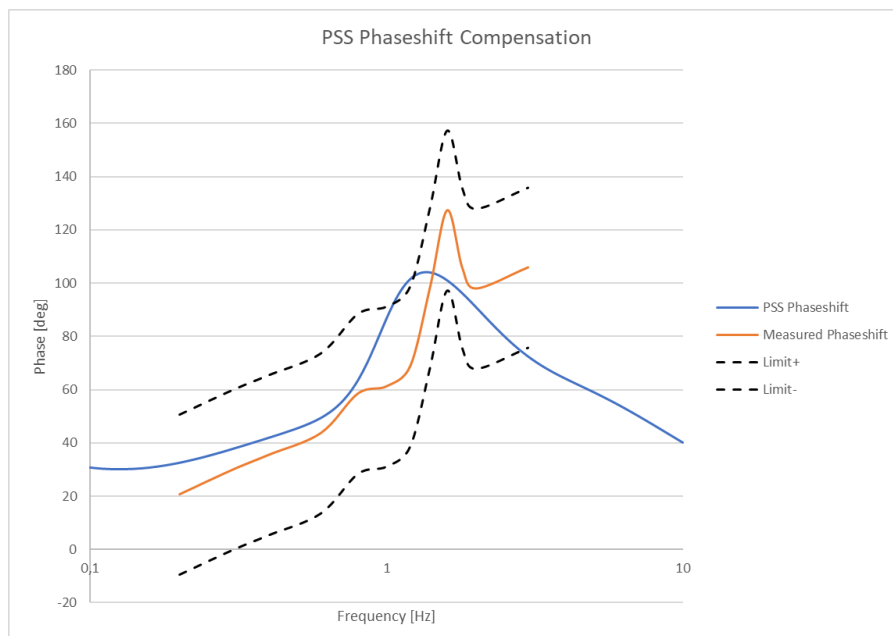
Benchmark 1:n mitattu vaihesiirto on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Taajuusvastekokeen mittausdata, benchmark 1.

Taajuus [Hz]	Viive [ms]	Kulma [°]
0,2	286	20,592
0,3	275	29,7
0,4	246	35,424
0,6	202	43,632
0,8	203	58,464
1	170	61,2
1,2	159	68,688
1,4	195	98,28
1,6	221	127,296
1,8	163	105,624
2	136	97,92
3	98	105,84



Kuva 13. Alkuperäinen vaihesiirto, Fingrid, benchmark 1.



Kuva 14. Alkuperäinen vaihesiirto, laskentyökalu, benchmark 1.

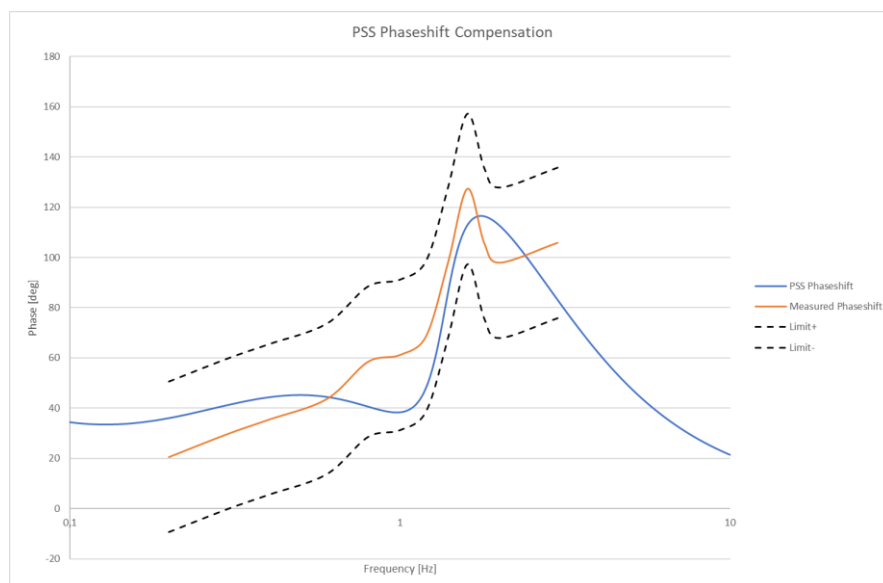
Verrattaessa kuvia 13 ja 14 havaitaan, että käyrät vastaavat toisiaan. Alkuperäisillä parametreilla kustannusfunktion arvo on 1502302.

6.1.2 Tulokset PSS2B

Tämän jälkeen laskentatyökalua käytettiin virittämään siirtofunktio PSS2B. Viritykset parametrit on listattu taulukossa 4. Kuvassa 15 esitetään PSS2B:n viritetty vaihesiirron kompensointi. Kustannusfunktion arvo viritetyillä parametreilla on 2908.

Taulukko 4. Viritetyt parametrit, PSS2B, benchmark 1.

Parametrin nimi	Alkuarvo	Viritetty arvo
H	2,32	2,32
Tw1	10	8,432
Tw2	10	8,432
Tw3	10	8,432
Tw4	10	8,432
T6	0,05	0,093
T7	10	8,432
T8	0,5	0,305
T9	0,1	0,1
Ks1	1	1
Ks2	2,155	1,817
Ks3	1	1
M	5	3
N	1	1
T1	0,12	0,173
T2	0,02	0,843
T3	0,4	0,61
T4	0,08	0,077
T10	1	0,655
T11	1	0,062
T12	1	1
T13	1	1



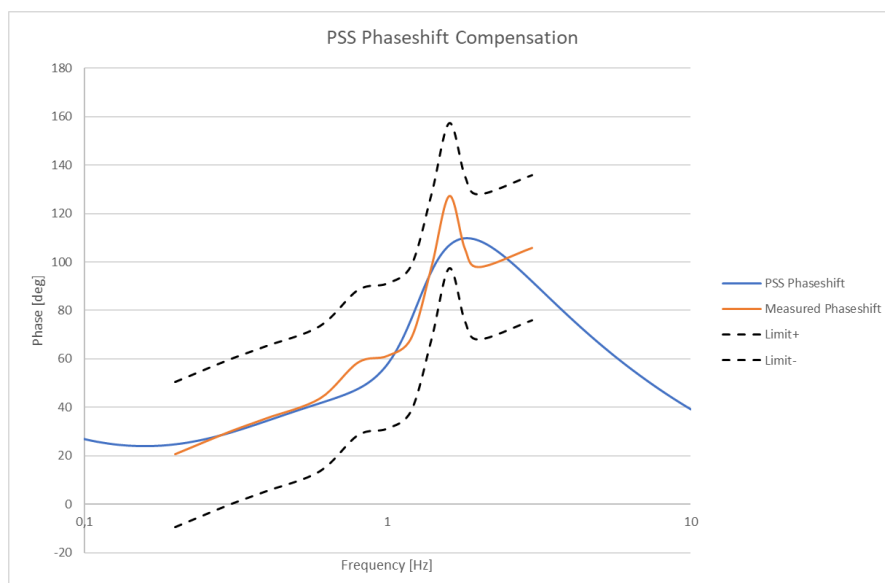
Kuva 15. Vaihesiirron kompensointi, PSS2B, benchmark 1.

6.1.3 Tulokset PSS2C

Tämän jälkeen laskentatyökalua käytettiin virittämään siirtofunktio PSS2C. Viritykset parametrit on listattu taulukossa 5. Kuvassa 16 esitetään PSS2C:n viritetty vaihesiirron kompensointi. Kustannusfunktion arvo viritetyillä parametreilla on 829.

Taulukko 5. Viritetyt parametrit, PSS2C, benchmark 1.

Parametrin nimi	Alkuarvo	Viritetty arvo
H	2,32	2,32
Tw1	10	8,553
Tw2	10	8,553
Tw3	10	8,553
Tw4	10	8,553
T6	0,05	0,093
T7	10	8,553
T8	0,5	0,219
T9	0,1	0,1
Ks1	1	1
Ks2	2,155	1,843
Ks3	1	1,045
M	5	3
N	1	1
T1	0,12	0,234
T2	0,02	0,125
T3	0,4	0,504
T4	0,08	0,681
T10	1	0,425
T11	1	0,387
T12	1	0,314
T13	1	0,021



Kuva 16. Vaihesiirron kompensointi, PSS2C, benchmark 1.

6.1.4 Yhteenveto

Kappaleessa 6.1.1 laskentatyökalulla piirretty vaihesiirron kompensointi vastasi Fingridin alkuperäistä kuvaajaa, joten siirtofunktion laskenta toimii benchmark 1:n tapauksessa. Benchmark 1:n kustannusfunktioiden arvot on kerätty taulukkoon 6.

Taulukko 6. Kustannusfunktioiden arvojen vertailu, benchmark 1.

Alkuperäinen viritys	PSS2B	PSS2C
1502302	2908	829

Tulosten perusteella sekä PSS2B että PSS2C on mahdollista virittää onnistuneesti laskentatyökalulla. Vertailtaessa kustannusfunktioiden arvoja sekä visuaalisesti kuvien 15 ja 16 kuvaajia, havaitaan että PSS2C:n virityksellä saatiin parempi tulos kuin PSS2B:llä.

6.2 Benchmark 2

6.2.1 Tulokset alkuperäisillä arvoilla

Benchmark 2:n annetut alkuperäiset parametrit on listattu taulukossa 7.

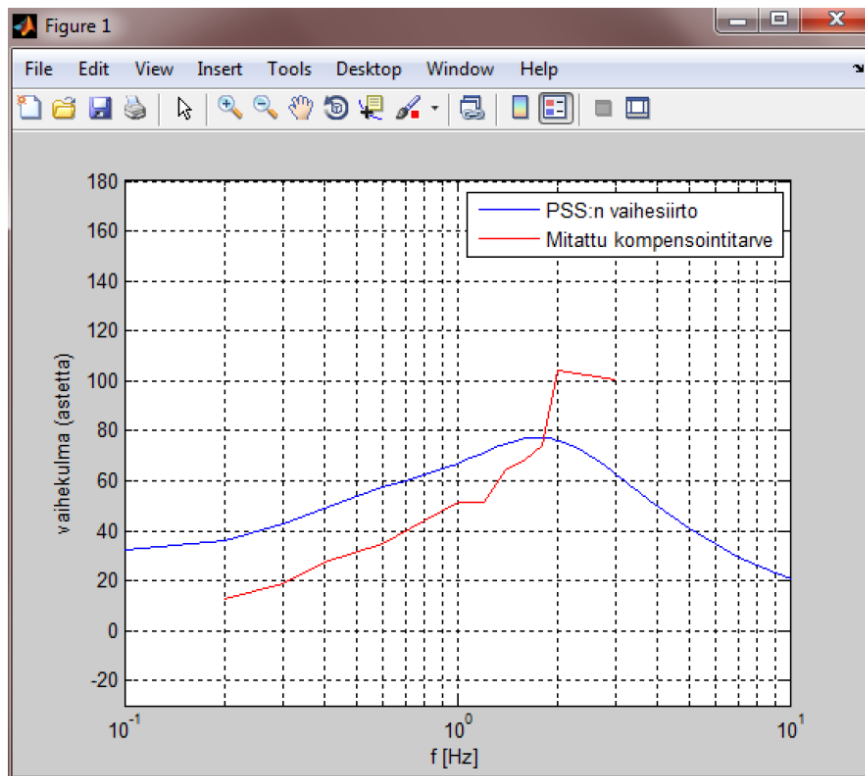
Taulukko 7. Alkuarvot, benchmark 2.

Parametrin nimi	Parametrin arvo
H	1,243
Tw1	10
Tw2	10
Tw3	10
Tw4	10
T6	0,020
T7	10
T8	0,4
T9	0,1
Ks1	1
Ks2	4,023
Ks3	1
M	4
N	1
T1	0,16
T2	0,05
T3	0,4
T4	0,08
T10	1
T11	1
T12	1
T13	1

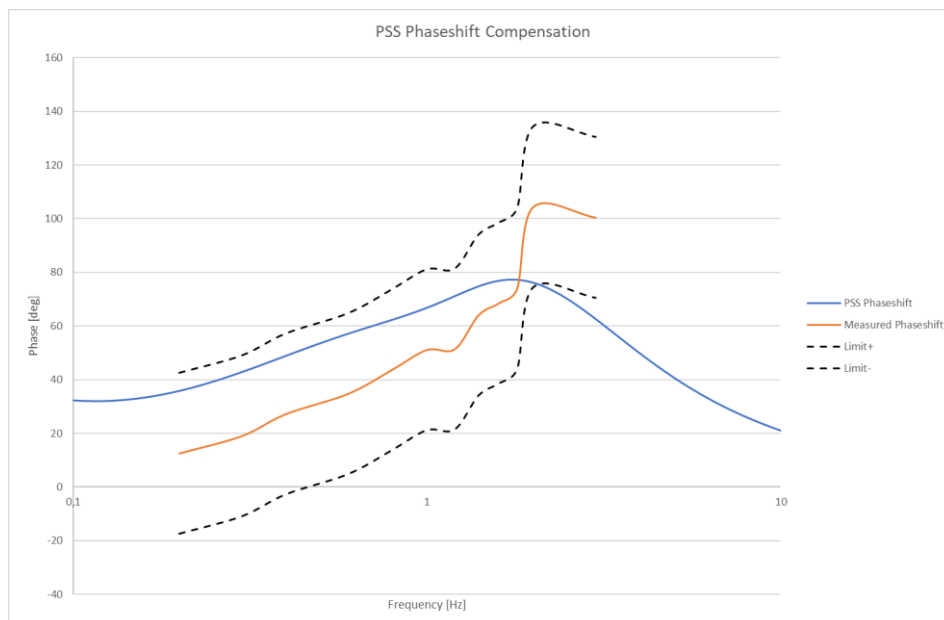
Benchmark 2:ssa mitattu vaihesiirto on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Taajuusvastekokeen mittausdata, benchmark 2.

Taajuus [Hz]	Viive [ms]	Kulma [°]
0,2	174	12,528
0,3	176	19,008
0,4	189	27,216
0,6	161	34,776
0,8	152	43,776
1	142	51,12
1,2	119	51,408
1,4	127	64,008
1,6	119	68,544
1,8	114	73,872
2	145	104,4
3	93	100,44



Kuva 17. Alkuperäinen vaihesiirto, Fingrid, benchmark 2.



Kuva 18. Alkuperäinen vaihesiirto, laskentatyökalu, benchmark 2.

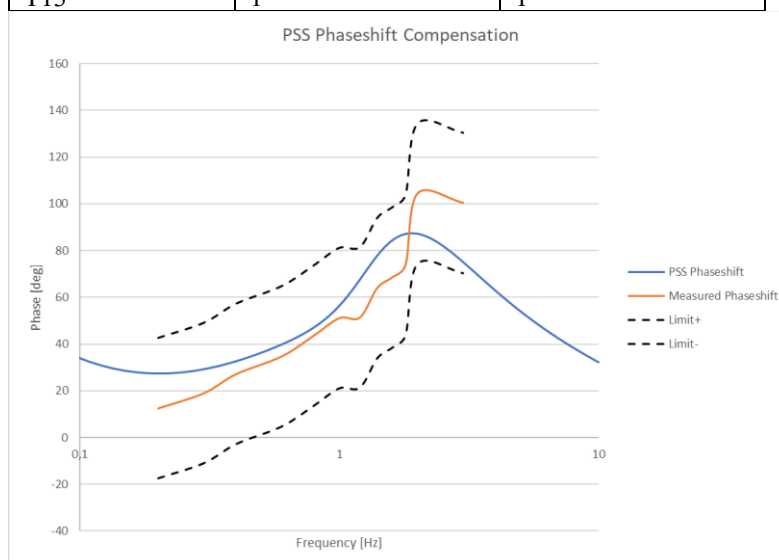
Verrattaessa kuvia 17 ja 18 havaitaan, että käyrät vastaavat toisiaan. Alkuperäisillä parametreilla kustannusfunktion arvo on 505873.

6.2.2 Tulokset PSS2B

Tämän jälkeen laskentatyökalua käytettiin virittämään siirtofunktio PSS2B. Viritykset parametrit on listattu taulukossa 9. Kuvassa 19 esitetään PSS2B:n viritetty vaihesiirron kompensointi. Kustannusfunktion arvo virityksillä parametreilla on 2164.

Taulukko 9. Viritykset parametrit, PSS2B, benchmark 2.

Parametrin nimi	Alkuarvo	Viritetty arvo
H	1,243	1,243
Tw1	10	6,611
Tw2	10	6,611
Tw3	10	6,611
Tw4	10	6,611
T6	0,020	0,032
T7	10	6,611
T8	0,4	0,410
T9	0,1	0,1
Ks1	1	1
Ks2	4,023	2,659
Ks3	1	1
M	4	4
N	1	1
T1	0,16	0,187
T2	0,05	0,026
T3	0,4	0,425
T4	0,08	0,084
T10	1	0,183
T11	1	0,451
T12	1	1
T13	1	1



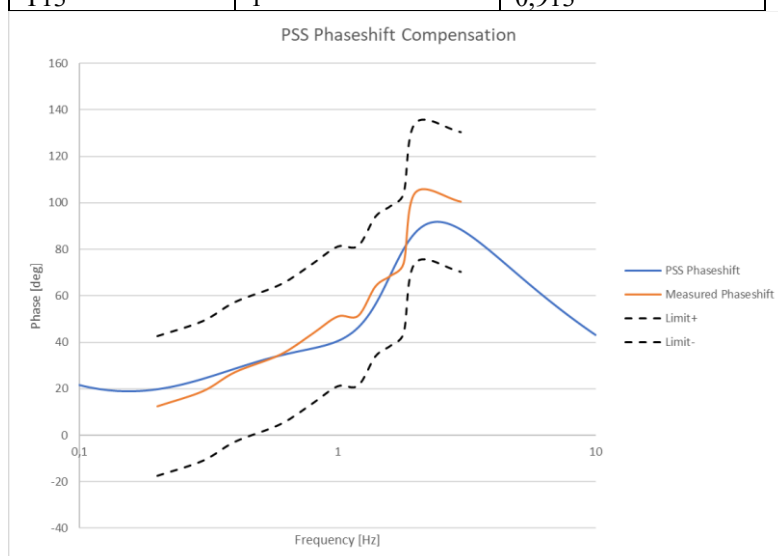
Kuva 19. Vaihesiirron kompensointi, PSS2B, benchmark 2.

6.2.3 Tulokset PSS2C

Tämän jälkeen laskentatyökalua käytettiin virittämään siirtofunktio PSS2C. Viritykset parametrit on listattu taulukossa 10. Kuvassa 20 esitetään PSS2C:n viritetty vaihesiirron kompensointi. Kustannusfunktion arvo viritetyillä parametreilla on 706.

Taulukko 10. Viritykset parametrit, PSS2C, benchmark 2.

Parametrin nimi	Alkuarvo	Viritetty arvo
H	1,243	1,243
Tw1	10	9,703
Tw2	10	9,703
Tw3	10	9,703
Tw4	10	9,703
T6	0,020	0,047
T7	10	9,703
T8	0,4	0,307
T9	0,1	0,1
Ks1	1	1
Ks2	4,023	3,903
Ks3	1	1,045
M	4	3
N	1	1
T1	0,16	0,232
T2	0,05	0,404
T3	0,4	0,523
T4	0,08	0,195
T10	1	0,25
T11	1	0,017
T12	1	0,633
T13	1	0,913



Kuva 20. Vaihesiirron kompensointi, PSS2C, benchmark 2.

6.2.4 Yhteenveto

Kappaleessa 6.2.1 laskentatyökalulla piirretty vaihesiirron kompensointi vastasi Fingridin alkuperäistä kuvaajaa, joten siirtofunktion laskenta toimii myös benchmark 2:n kohdalla. Benchmark 2:n kustannusfunktioiden arvot on kerätty taulukkoon 11.

Taulukko 11. Kustannusfunktioiden arvojen vertailu, benchmark 2.

Alkuperäinen viritys	PSS2B	PSS2C
505873	2164	706

Tulokset noudattavat benchmark 1:n kaavaa, sekä PSS2B että PSS2C on mahdollista virittää onnistuneesti laskentatyökalulla. Vertailtaessa kustannusfunktioiden arvoja sekä visuaalisesti kuvien 19 ja 20 kuvaajia, havaitaan että PSS2C:n virityksellä saatiin parempi tulos kuin PSS2B:llä.

7 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli muodostaa PSS2C-lisästabilointipiirin lohkokaaviosta siirtofunktio ja luoda säätöpiirin parametrien optimointia varten laskentatyökalu. Toinen laskentatyökalulle asetettu vaatimus oli taajuusvasteen vaihe- ja itseisarvokuvaajien piirto. Asetetut tavoitteet saavutettiin: Siirtofunktio muodostettiin onnistuneesti PSS2C:n lohkokaaviosta, laskentatyökalu luotiin Microsoft Exceliin ja sen toiminta todennettiin.

Laskentatyökalun testaus aloitettiin vertaamalla sillä piirrettyjä taajuusvasteen kuvaajia Fingridiltä saatuihin kuvaajiin kahdesta eri referenssistä. Kuvaajat olivat yhdenmuotoisia ja seuraavaksi testattiin työkalun kykyä optimoida parametreja. Tässä vaiheessa kävi ilmi, että mikäli parametrien alkuarvot ovat täysin mielivaltaiset, optimointiprosessin tuloksena saavat parametrit eivät välttämättä ole käyttökelpoisia. Käytännössä optimointialgoritmi juuttuu johonkin paikalliseen minimiin. Ongelma huomioitiin optimointialgoritmin parametreille määritetyillä lisärajoitteilla, sekä laskentatyökalun käyttäjälle laadituissa ohjeissa.

Molempien referenssien tapauksessa laskentatyökalulla optimoitujen PSS2B:n ja PSS2C:n taajuusvasteet olivat kuvaajien ja kustannusfunktion arvojen perusteella parempia kuin todelliset arvot. Referenssien vaihesiirto oli jonkin verran ylikompensoitu, mutta syynä saattaa olla jokin paikallinen värähtely, joka on saatu kyseisellä parametroinnilla kompensoitua parhaiten. Laskentatyökalu onnistui virittämään PSS2C:n molempien referenssien tapauksessa paremmin kuin PSS2B:n, mutta kahden referenssin perusteella on vielä liian aikaista tehdä johtopäätöstä, että PSS2C olisi aina parempi vaihtoehto.

Laskentatyökalun tuottamien raporttisivujen ja kuvaajien ulkoasua tullaan vielä muokkaamaan VEO:n tarpeiden mukaisesti. Ohjeistusta työkalun käyttöön täydennetään kokemusten mukaan. Suunnitelmassa on käyttää työkalua seuraavassa lisästabiloinnin käyttöönotossa ja jos käyttöönotto sujuu hyvin, myös kaikissa muissa tulevilla.

Lisästabilointipiirin ennakkoviritykseen ohella myös generaattorin ja jännitesäätäjän muodostamaa taajuusvastetta on yritetty simuloida. Kyseiset ennakkomallinlaskelmat eivät mittausten perusteella ole vastanneet todellista taajuusvastetta riittävällä tarkkuudella vielä missään kohteessa. Ennakkomallinnetun vaihesiirron ja mitatun vaihesiirron eroavaisuuksien selvittäminen olisi oivallinen jatkotutkimusaihe.

Toinen mahdollinen jatkotutkimusaihe olisi lisästabilointipiirin vahvistuksen määrittäminen ennakkoon. Tällä hetkellä Fingridin viralliset ohjeistuksen suosittelevat vahvistuksen määrittämistä käyttöönoton yhteydessä tehtävillä kokeilla. Mikäli tarvittavan vahvistuksen arvo voitaisiin määrittää luotettavasti ennakkoon, käyttöönotossa voitaisiin säästää aikaa, kun vahvistukseen liittyviä kokeita ei tarvitsisi suorittaa.

LÄHTEET

EngineerExcel. 2022. Excel Solver: Which Solving Method Should I Choose?. Viitattu 17.5.2022. <https://engineerexcel.com/excel-solver-solving-method-choose/>

Fingrid. 2018. Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset VJV2018. Viitattu 13.5.2022. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kaytto-varma-sahkonsiirto/vjv2018.pdf>

Hammer, A. 2011. Analysis of IEEE Power System Stabilizer Models. Viitattu 13.5.2022. https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/257120/445805_FULLTEXT01.pdf

Heino, R. 2014. Laplace-muunnos ja sen soveltaminen differentiaaliyhtälöiden teoriaan. Viitattu 17.5.2022. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2017112251873>

IEEE. 2016. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. Teoksessa IEEE Std 421.5-2016 (Revision of IEEE Std 421.5-2005).

Lewis, P. H. & Yang, C. 1997. Basic Control Systems Engineering. Upper Saddle River, New Jersey. Prentice Hall.

Linnamaa, L. 2022. Lisästabilointipiirin toiminnan simulointi. Email Lasse.Linnamaa@fingrid.fi 9.5.2022.

Smith, J. O. 2007. Introduction to Laplace Transform Analysis. Teoksessa Introduction to Digital Filters with Audio Applications. Viitattu 17.5.2022. https://ccrma.stanford.edu/~jos/filters/Laplace_Transform_Analysis.html

Tutorialspoint. 2022 a. Control Systems – Block Diagram Algebra. Viitattu 17.5.2022. https://www.tutorialspoint.com/control_systems/control_systems_block_diagram_algebra

Tutorialspoint. 2022 b. Low Pass and High Pass Filter Bode Plot. Viitattu 17.5.2022. <https://www.tutorialspoint.com/low-pass-and-high-pass-filter-bode-plot>

VEO Oy. VEO Oy nettisivut. Viitattu 17.5.2022. <https://www.veo.fi/>

Wikipedia. 2018. Bode-diagrammi. Viitattu 17.5.2022. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Bode-diagrammi>

Wikipedia. 2021. Evolutionary Algorithm. Viitattu 25.5.2022. https://en.wikipedia.org/wiki/Evolutionary_algorithm

Wikipedia. 2022 a. Loss Function. Viitattu 25.5.2022. https://en.wikipedia.org/wiki/Loss_function

Wikipedia. 2022 b. Mathematical optimization. Viitattu 25.5.2022. https://en.wikipedia.org/wiki/Mathematical_optimization