



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

Tuulivoimalan simulointi laboratorioympäristössä

Simulaatiomallin jatkokehitys

Turkka Säteri

Opinnäytetyö
Helmikuu 2019
Sähkö- ja automaatiotekniikka
Sähkövoimatekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

SÄTERI, TURKKA

Tuulivoimalan simulointi laboratorioympäristössä
Simulaatiomallin jatkokehitys

Opinnäytetyö 33 sivua, joista liitteitä 5 sivua
Helmikuu 2019

Tämä opinnäytetyö on tehty Tampereen ammattikorkeakoulun sähkölaboratorioon. Työn tarkoituksena oli jatkokehittää jo olemassa olevaa tuulivoimalan simulointijärjestelmää.

Työlle asetettiin kaksi tavoitetta; kyky simuloida eri kuormitusilanteita erillisestä tiedostosta luetulla mittausdatalla sekä saada olemassa oleva momentin takaisinkytkentä toimimaan. Tuulivoimalan mallintamiseen käytettiin taajuusmuuttajalla ohjattua servomoottoria ja kuormana taajuusmuuttajalla ohjattua oikosulkumoottoria.

Servomoottoria ohjaavalta taajuusmuuttajalta välitettiin momentinarvo jänniteviestinä logiikalle. Logiikalla laskettiin servomoottorille uusi nopeusohje mitatun momentin avulla. Nopeusohje syötettiin takaisin taajuusmuuttajalle jänniteviestinä.

Logiikkana käytettiin National Instrumentsin CompactRIO -järjestelmää. CompactRIO on korkeasuorituskykyinen sulautettu ohjain, joka on laajennettavissa National Instrumentsin ja kolmansienosapuolien lisäkorteilla. Tässä työssä käytettiin kahta analogista lisäkorttia, joista toinen oli sisääntulolle ja toinen ulostulolle.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical Engineering
Option of Electrical Power Engineering

SÄTERI, TURKKA

Wind Turbine Simulation in Laboratory Environment
Further development of simulation model

Bachelor's thesis 33 pages, appendices 5 pages
February 2019

This thesis is made for the electrical laboratory in Tampere University of Applied Sciences. The purpose of this thesis was to further develop the already existing wind turbine simulation system.

Two goals were set for the work; the ability to simulate different load situations with exported data from a different file and trying to get the already existing torque feedback to work. The wind turbine was simulated by a servomotor which was controlled by a frequency converter. The load was simulated by an induction motor which was controlled by a frequency converter.

The measured torque was transmitted from the frequency converter driving the servomotor as a voltage signal to logic. A new speed reference was calculated for the servomotor using a measured modulation. The speed reference was fed back to the frequency converter with a voltage signal.

The logic system that were used was National Instruments CompactRIO. CompactRIO is a high-performance embedded controller, that can be expanded with additional modules from National Instruments or third parties. Two additional analog modules were used, one for the input and the other for the output.

Key words: wind power, simulation, labview

SISÄLLYS

| | | |
|---|---|----|
| 1 | JOHDANTO..... | 6 |
| 2 | TUULIVOIMAN HISTORIA JA TEORIA..... | 7 |
| | 2.1 Historia..... | 7 |
| | 2.2 Tuulivoima Suomessa..... | 8 |
| | 2.3 Teoria..... | 10 |
| 3 | TUULIVOIMAN SIMULOIMINEN LABORATORIOSSA..... | 13 |
| | 3.1 Servomootori..... | 13 |
| | 3.2 Oikosulkumootori..... | 15 |
| | 3.3 National Instruments CompactRIO..... | 16 |
| | 3.4 LabVIEW..... | 17 |
| 4 | SIMULOINTIOHJELMA..... | 20 |
| | 4.1 Tehokertoimen takaisinkytkentä..... | 20 |
| | 4.2 Mittausdatan lukeminen..... | 23 |
| | 4.3 Simuloinnin tulokset..... | 26 |
| 5 | POHDINTA..... | 27 |
| | LÄHTEET..... | 28 |
| | LIITTEET..... | 29 |
| | Liite 1. Ohjelmointikoodi..... | 29 |
| | Liite 2. Ohjauspaneeli..... | 30 |
| | Liite 3. Mittauspöytäkirjan luku..... | 31 |
| | Liite 4. Tiedostosta luetun tuulennopeuden ohjauspaneeli..... | 32 |
| | Liite 5. Tehokerroin tuulennopeuden funktiona..... | 33 |

LYHENTEET JA TERMIT

| | |
|-------------|--|
| CompactRIO | National Instrumentsin teollisuuteen valmistama ohjausjärjestelmä |
| c_p | Tuulivoimalan tehokerroin |
| c_t | Tuulivoimalan momenttikerroin |
| IIoT | Industrial Internet of Things, esineiden internet |
| LabVIEW | Graafinen ohjelmointiympäristö |
| n | Roottorin pyörimisnopeus, 1/min |
| P | Teho, W |
| Roottori | Tuulivoimalan navan ja lapojen muodostama osa |
| T | Momentti, Nm |
| Turbiini | Laite, joka muuttaa liike-energian pyörimisenergiaksi |
| U_{in} | Sisääntulo jännite, V |
| U_{out} | Ulostulo jännite, V |
| $v_{kärki}$ | Roottorin lavan kärjen nopeus, m/s |
| v_{tuuli} | Tuulenopeus, m/s |
| λ | Kärkinopeussuhde, tuulenopeuden ja roottorin lavan kärkinopeuden välinen suhde |
| ρ | Ilman tiheys, kg/m ³ |
| ω | kulmanopeus |

1 JOHDANTO

Tuulivoima on ollut 1990-luvulta lähtien nopeimmin kasvava sähköntuotantomuoto maailmassa. Viime vuonna EU:n alueella asennettiin enemmän tuulivoimaa kuin mitään muuta uutta energiantuotantomuotoa. Tämän seurauksena uusi tuulivoimakapasiteetti kasvoi 55% prosenttia Euroopassa viime vuonna asennetusta sähköntuotannosta. Vuoden 2017 lopussa EU-maiden tuulivoimakapasiteetti oli 168,7 GW. Koko maailman tuulivoimakapasiteetti on 539 GW, joka vastaa yli 5 % maailman sähköntarpeesta. (Tuulivoimayhdistys). Vuoteen 2030 mennessä tuulivoiman odotetaan tuottavan noin 15% maailman sähköstä. (VTT, 2018)

Opinnäytetyö tehtiin Tampereen ammattikorkeakoulun sähkölaboratorioon. Työssä jatkokehitettiin aikaisemmin tehtyä LabVIEW -simulaatiomallia, jolla simuloidaan tuulivoimalan roottorin käyttäytymistä. Alustavasti roottorin toimintaa mallinsi servomoottori, mutta tulevaisuudessa roottorin mallintamiseen saatetaan käyttää 22 kW oikosulkumoottoria.

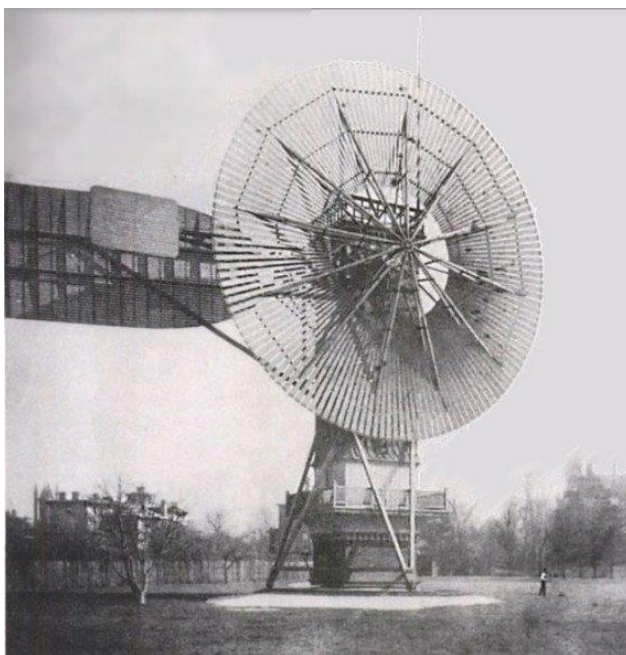
2 TUULIVOIMAN HISTORIA JA TEORIA

2.1 Historia

Tuulivoima on vanhimpia energiantuotantomuotoja. Varhaisimmat tuulimyllyt olivat vertikaaliakselisia myllyjä, joita käytettiin veden siirtämiseen pelloille. Tekniikka kehitettiin 600-luvulla eaa. Lähi-Idän alueella, josta se 1300-luvulle mennessä levisi läntiseen Eurooppaa. Tuulivoiman perimmäinen käyttötarkoitus 1300-luvulla oli viljan jauhanta. Tästä periytyykin nimitys tuulimylly, joka on käytössä vielä tänä päivänä.

Ensimmäinen maininta tuulimyllyistä Suomessa on vuodelta 1463 Turun seudulta. 1500-luvun loppuun mennessä tuulimyllyt yleistyivät voimakkaasti Lounais-Suomessa ja vuosisadan lopulla niiden lukumäärä oli suunnilleen 400 kappaletta. Itä-Suomessa tuulimyllyt yleistyivät vasta 1800-luvulla.

Vuonna 1887 skotlantilainen professori James Blyth rakensi ensimmäisiä sähköä tuottavan tuulivoimalan. Myöhemmin samana vuonna yhdysvaltalainen professori Charles F. Brush rakensi 12 kW tuulivoimalan, jolla hän latasi asuntonsa kellarissa olevia 408 akkua. Kuvassa 1 on esitetty Brushin tuulivoimala, jossa roottorin halkaisija oli 50 metriä ja siinä oli 144 lapaa. (The Guardian)



KUVA 1. Charles Brushin rakentama tuulivoimala (Cleantechnica)

Suomessa kehitettiin 1900-luvulla vertikaalinen Savonius -roottori, joka on esitetty kuvassa 2. Roottoria käytetään lähinnä ilmastointitekniikassa ja siitä syystä ne ovatkin yleinen näky vanhojen kerrostalojen katoilla. (Tuulivoimayhdistys)



KUVA 2. Savonius -roottori (www.juggaar.com)

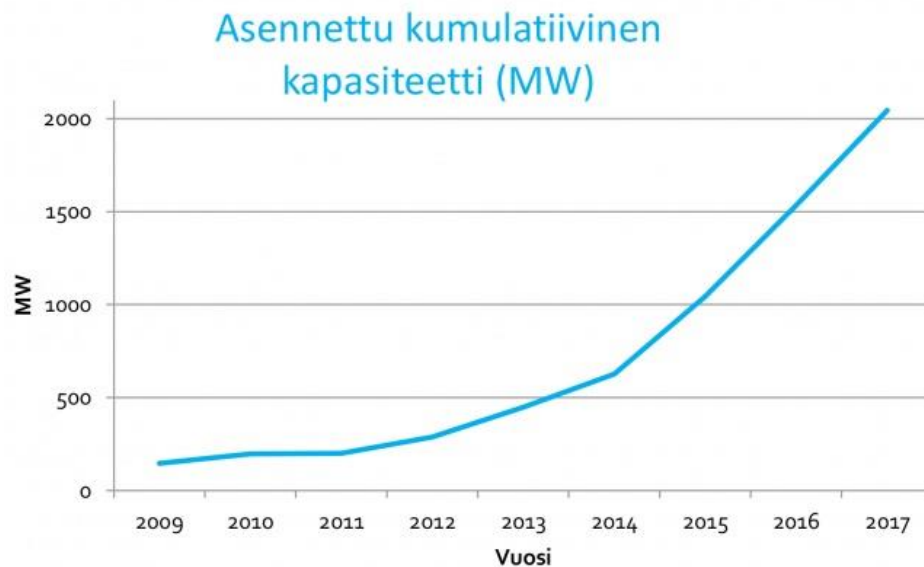
Tanskalainen tutkija Poul la Cour aloitti tuulivoiman kehittämisen 1800-luvun lopulla Euroopassa. La Cour huomasi ensimmäisenä, että harvalapaiset roottorit suurilla pyörimisnopeuksilla ovat hyötysuhteeltaan tehokkaimpia sähköntuotannossa verrattuna muihin roottorityyppeihin.

2.2 Tuulivoima Suomessa

Ensimmäinen tuulivoimala rakennettiin Inkoon Koppnäsiin vuonna 1991, joka oli nimellisteholtaan 200 kW. Suomen ensimmäinen tuulipuisto rakennettiin Vaasan Korsnäsiin, joka sittemmin purettiin 26 vuoden toiminnan jälkeen vuonna 2017. Korsnäsin tuulipuisto koostui neljästä 200 kW voimalasta.

Tuulivoimaloiden rakennuttamista Suomeen vauhditettiin syöttötariffilla, joilla taattiin muun muassa tuulivoimalla tuotetulle sähkölle tietty hinta. Tukea maksettiin 12 vuotta siitä hetkestä alkaen, kun hankkeet olivat päässeet järjestelmään. Tariffin suuruus oli 83,5 €/MWh eli valtio maksoi tukea tuulivoimantuottajille sähkön markkinahinnan ja syöttötariffin erotuksen verran. Tuen maksamisen myöntäminen lopetettiin 1.11.2017.

15.11.2018 mennessä Suomessa oli julkaistu yhdeksän tuulivoimalainvestointia, jotka rakennetaan ilman valtion myöntämää tukea. Ilman tukea rakennettavien tuulivoimaloiden yhteiskapasiteetti oli 340,2 MW. Kuvassa 3 on esitetty Suomen tuulivoimaloiden kumulatiivinen tuotantokapasiteetti.



KUVA 3. Suomen kumulatiivinen tuulivoimakapasiteetti (Tuulivoimayhdistys)

Vuoden 2018 lopussa Suomessa oli yhteensä 698 tuulivoimalaa ja niiden sähköntuoton kokonaiskapasiteetti oli 2041 MW. Tuulivoimalla tuotettiin vuonna 2018 5,8 TWh sähköä, joka kattoi 6,7 % Suomen vuotuisesta sähkönkulutuksesta. (Tuulivoimayhdistys)

2.3 Teoria

Kolmilapaiselle tuulivoimalalle, jonka roottori on horisontaalinen, saadaan laskettua teho kaavalla 1.

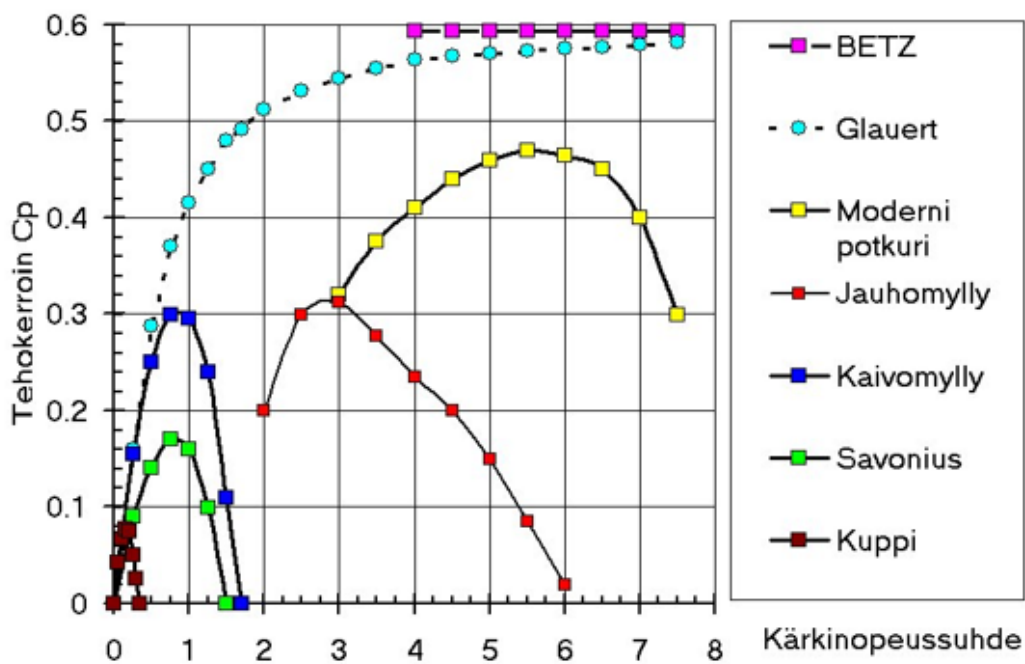
$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{tuuli}^3 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot c_p \quad (1)$$

jossa, P on teho watteina, ρ on ilman tiheys kilogrammoina kuutiometrissä, v_{tuuli} tuulennopeus metreinä sekunnissa, r on roottorin lavan pituus metreinä ja c_p on tehokerroin. (Huhtinen ym. 2008, s. 284)

Tehokerroin on jokaiselle tuulivoimalalle ominainen ja riippuu roottorin rakenteesta. Tehokerroin riippuu voimalan kärkinopeussuhteesta. Kärkinopeus saadaan laskettua kaavalla 2.

$$\lambda = \frac{v_{kärki}}{v_{tuuli}} \quad (2)$$

jossa λ on kärkinopeussuhde, $v_{kärki}$ on roottorin lavan kärjen nopeus metreinä sekunnissa, ja v_{tuuli} on tuulennopeus metreinä sekunnissa.



KUVA 4. Tehokerroin kärkinopeussuhteen funktiona eri roottorityypeillä (Haapanen, E.)

Kuvassa 4 näkyvä BETZin roottori on saksalaisen fyysikko Albert Betzin mukaan nimetty ideaalinen tuuliturbiini. Betz osoitti vuonna 1926, että suurin mahdollinen tehokerroin roottorille on $16/27$ joka on noin 59,3 %. Todellisuudessa tehokerroin jää pienemmäksi muun muassa tuulen pyörteisyyden ja generaattorissa tapahtuvien häviöiden seurauksena.

Tuulivoimalan tuottama momentti saadaan laskettua seuraavalla kaavalla

$$T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot r^3 \cdot \pi \cdot v_{tuuli}^2 \cdot c_t \quad (3)$$

jossa, T on momentti newtonmetreinä, ρ on ilman tiheys kilogrammoina kuutiometrissä, r on roottorin lavan pituus, v_{tuuli} on tuulennopeus metreinä sekunnissa ja c_t on momenttikerroin.

Momenttikertoimen c_t välinen yhteys tehokerroimeen c_p sekä kärkinopeussuhteen λ saadaan johdettua kaavan 4 avulla.

$$\omega = \frac{P}{T} \quad (4)$$

$$\frac{v_{kärki}}{r} = \frac{P}{T}$$

jossa, ω on kulmanopeus, P on teho watteina ja T on momentti newtonmetreinä, $v_{kärki}$ on roottorin kärjen kärkinopeus metreinä sekunnissa ja r on roottorin lavan pituus metreinä. (Mäkelä, M. 2012 s.92-93)

Kaavaan 4 sijoittaa tehon ja momentin tilalle kaavat 1 ja 3 sekä sievennetään saatu lauseke, päädytään seuraavanlaiseen yhtälöön.

$$c_t = \frac{c_p}{\lambda} \quad (5)$$

Esimerkiksi tuulivoimalan, jonka roottorin halkaisija on 8 metriä, tuottama teho voidaan laskea kaavalla 3.

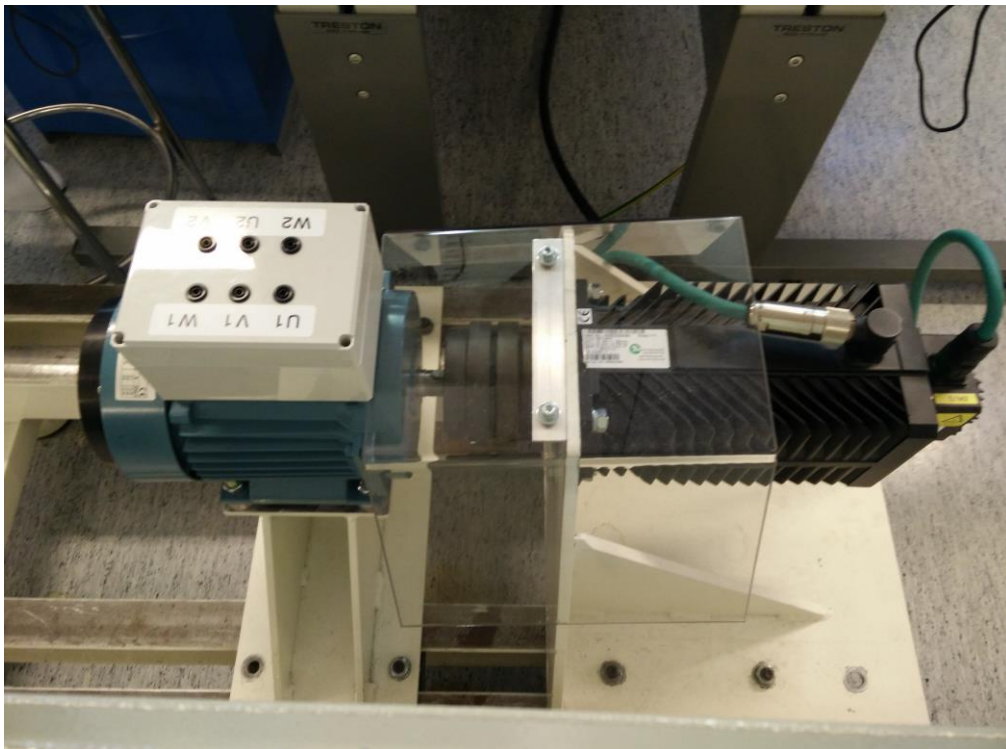
$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{tuuli}^3 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot c_p$$
$$P = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \text{ kg/m}^3 \cdot (10 \text{ m/s})^3 \cdot \pi \cdot 4 \text{ m}^2 \cdot 0,44$$
$$P = 13\,546,547 \dots \text{ W} \approx 14 \text{ kW}$$

Esimerkissä on oletettu, että ilman tiheys on 1,225 kilogrammaa per kuutiometri, tuulennopeus 8 metriä sekunnissa ja tuulivoimalan tehokerroin on 0,44.

3 TUULIVOIMAN SIMULOIMINEN LABORATORIOSSA

3.1 Servomoottori

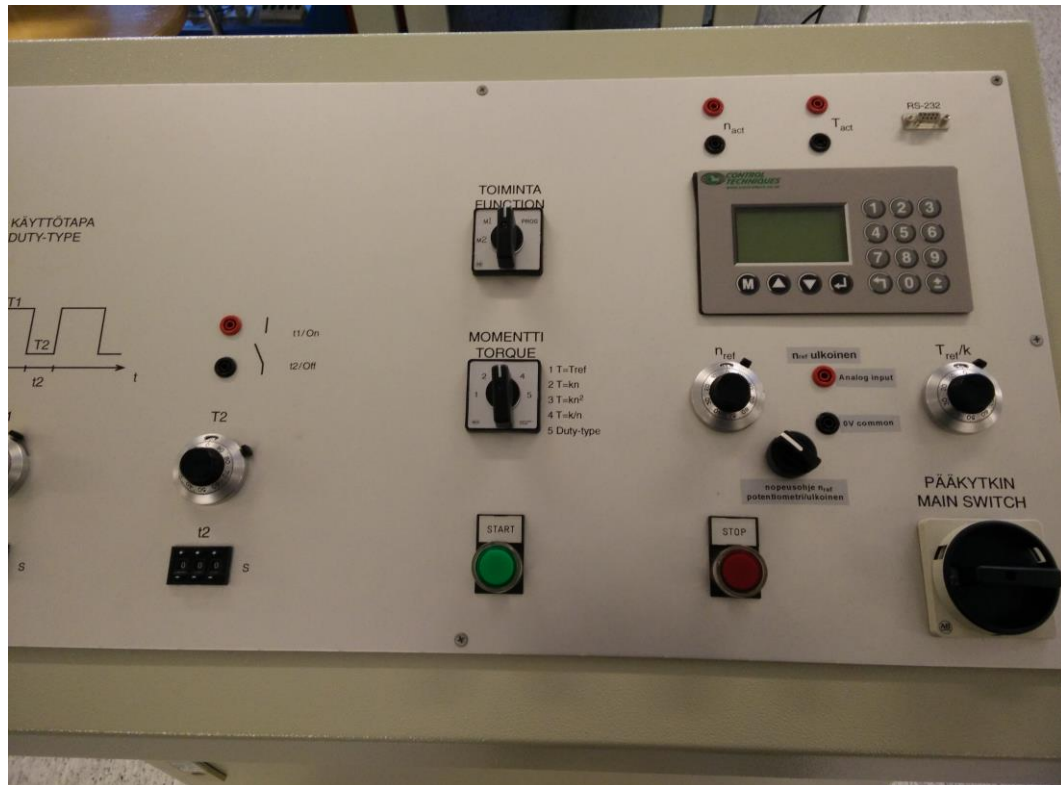
Työssä käytettiin Control Techniquesin valmistamaa 142UME300CACAA -servomoottoria mallintamaan tuulivoimalan roottoria. Servomoottorin ohjaus toteutettiin Control Techniquesin valmistamalla taajuusmuuttajalla.



KUVA 5. Oikosulku- ja servomoottori

Kuvan 5 oikeassa reunassa on tuulivoimalan roottorin toimintaa mallintava servomoottori. Lisäksi kuvasta huomataan, että pyörivät akselit ovat suojattu kosketukselta kirkaalla pleksillä.

Servomoottorin ohjaaminen suoritettiin tuomalla nopeusohje 10 V jänniteviestinä taajuusmuuttajan ohjauspaneelissa näkyville n_{ref} -liittimille. 10 V analoginen ohjaussignaali mahdollistaa servomoottorin pyörimisnopeuden säädön portaattomasti 0-3000 rpm välillä. Ohjauspaneelista saatiin mitattua akselilla oleva momentti 10 V jänniteviestinä T_{act} -liittimien kautta. Mitattu momentti syötettiin takaisin CompactRIO -järjestelmään NI 9215 -moduulille ja sen avulla laskettiin ohjauspaneelille syötettävä nopeusohje.



KUVA 6. Servomootorin ohjauspaneeli

Kuvasta 6 nähdään n_{ref} - sekä T_{act} -liittimet. T_{act} -liitin sijaitsee oikeassa yläreunassa sarjaportin vieressä ja n_{ref} -liitin oikeassa reunassa, keskikorkeudella ohjauspaneelia. Lisäksi kuvan oikeasta alareunasta näkyy valintakytkin servomootorin ohjaukselle. Servomootorin pyörimisnopeutta voidaan ohjata joko ohjauspaneelisti suoraan tai syöttämällä ulkoinen nopeusohje jänniteviestinä.

3.2 Oikosulkumoottori

Servomoottoria kuormitettiin ABB:n M2AA090L oikosulkumoottorilla, joka kuvasi tuulivoimalalta otettavaa tehoa. Kuvan 5 vasemmassa reunassa on ABB:n M2AA090L oikosulkumoottori. Moottorin päällä on kytkentälaatikko, jonka avulla moottori voidaan helposti vaihtaa tähtikytkennästä kolmiokytkentään. Oikosulkumoottoria ohjattiin ABB:n ACS-600 taajuusmuuttajalla, joka on esitetty kuvassa 7.



KUVA 7. ABB ACS-600 taajuusmuuttaja

Taulukossa 1 on esitetty moottorin nimellisarvot.

TAULUKKO 1. Oikosulkumoottorin kilpiarvot

| Motor 3~ CLF IP55 IEC34 | | | | | |
|--------------------------------|----|-------------------|------|-----|-------|
| M2AA090L 3GAA092002-ADA | | | | | |
| V | Hz | min ⁻¹ | kW | A | cos φ |
| 660-690 Y | 50 | 1420 | 1.4 | 2.1 | 0.79 |
| 380-420 D | 50 | 1420 | 1.4 | 3.5 | 0.79 |
| 440-480 D | 60 | 1710 | 1.75 | 3.5 | 0.78 |

3.3 National Instruments CompactRIO

Työssä käytetty CompactRIO on osa National Instrumentsin RIO tuoteperhettä. RIO -lyhenne tulee sanoista Reconfigurable I/O eli uudelleen konfiguroitavat siirännät. CompactRIO -järjestelmä koostuu kontrollerista, esitetty kuvassa 8, sekä erillisistä I/O moduuleista. CompactRIO tuotteet soveltuvat hyvin IIoT -sovelluksiin, valvontaan sekä ohjaussovelluksiin. (National Instruments, 2018)



KUVA 8. CompactRIO kontrolleri (National Instruments)

Tässä työssä kontrolleriin liitettiin NI 9215 analoginen jännitteen sisääntulomoduli sekä NI 9263 analoginen jännitteen ulostulomoduli. Kuvassa 9 on esitetty esimerkiksi RIO kontrolleriin liitettävä lisämoduuli, tässä tapauksessa NI 9263, joka on myös käytössä tässä työssä.

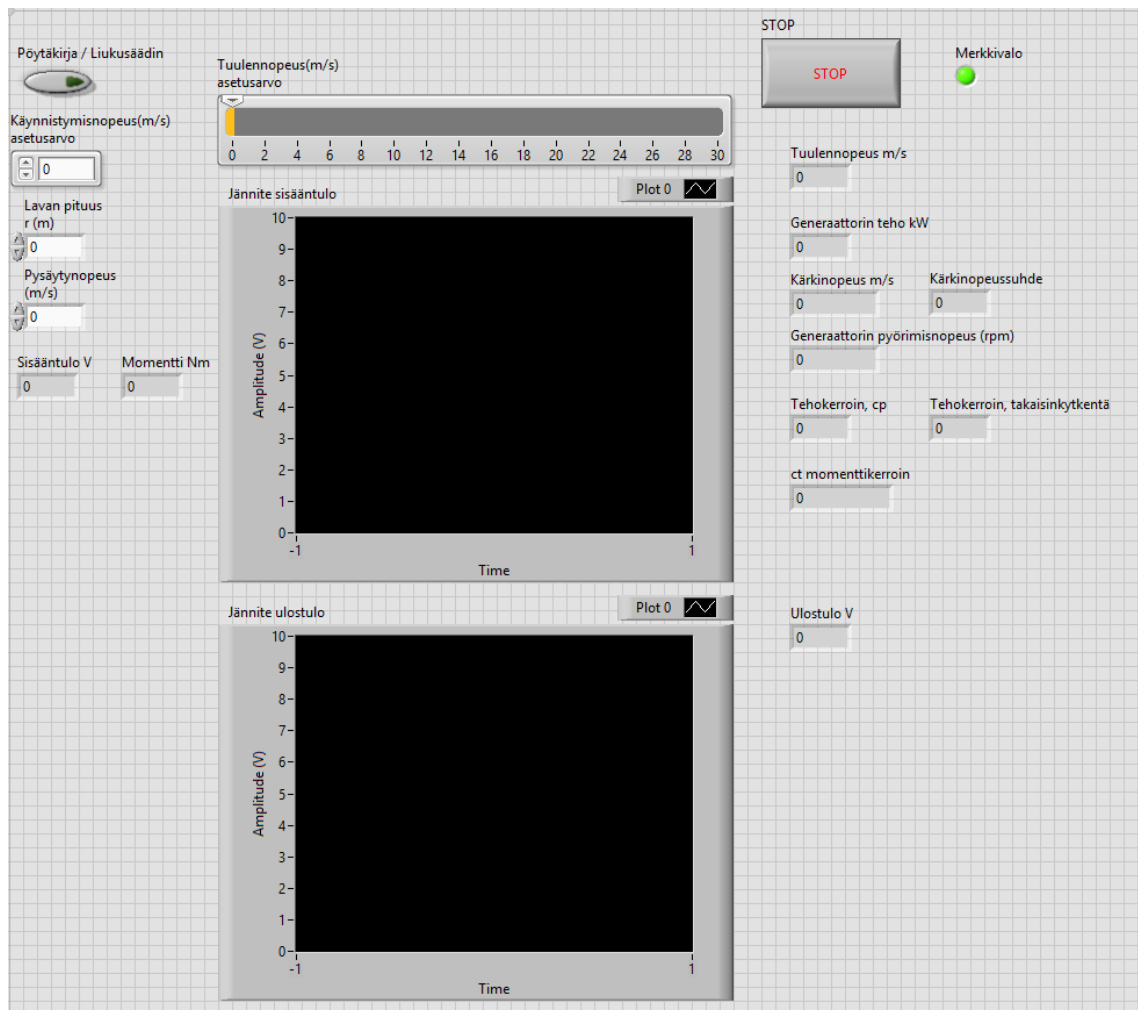


KUVA 9. Lisämoduuli RIO järjestelmään, NI 9263 (National Instruments)

Moduulikorteista käytettiin AO 0 ja AI 0 liitäntöjä. NI 9215 moduulin analog input, analoginen sisääntulo, syöttää momenttitiedon LabVIEW -ohjelmistolle. Lisäksi NI 9215 moduulin COM liitin oikosuljettiin AI -0 liittimen kanssa. NI 9263 moduulin analog output, analoginen ulostulo, syöttää servomoottorin ohjauspaneelille nopeusohjeen LabVIEW:stä.

3.4 LabVIEW

LabVIEW on National Instrumentsin kehittämä graafinen ohjelmointiympäristö, jolla tehdään ohjelmia National Instrumentsin tuotteille. Tässä työssä jatkokehitettiin aikaisemmin tehtyä simulointimallia National Instrumentsin myDAQ signaalinkäsittelytyökälle.

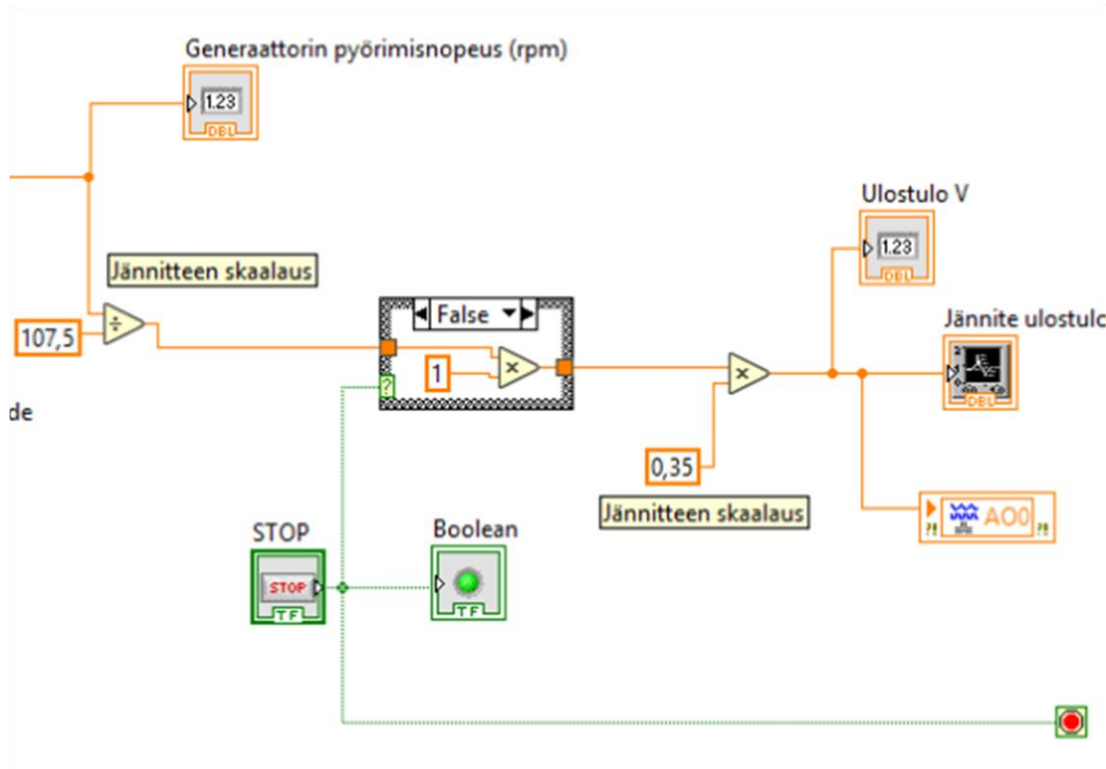


KUVA 10. LabVIEW ohjauspaneeli

Kuvassa 10 on simulointityökalun ohjauspaneeli. Vasemmassa reunassa on arvot, jotka käyttäjän tulee itse asettaa, tuulivoimalan lavan pituus sekä pysäytys- ja käynnistymisnopeus tuulivoimalalle. Liukusäätimellä voidaan asettaa haluttu tuulennopeus tai painonappia painamalla voidaan valita ulkoisesta tiedostosta luettava tuulennopeus.

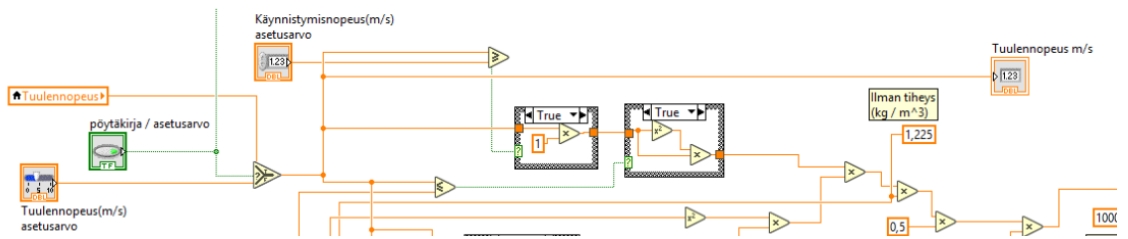
Ohjauspaneeliin on lisätty kuvaajat piirtämään sisääntulo ja ulostulo jännitteet. Sisääntulevasta jännitteestä lasketaan koodiin syötetyn momenttikertoimen avulla momentti, joka näkyy ohjauspaneelin vasemmassa reunassa. Oikeassa reunassa näytetään ohjelmassa lasketut arvot mm. generaattorin pyörimisnopeus, kärkinopeus, kärkinopeussuhde ja ulostulo jännite voltteina. Ulostulo jännite vastaa servomoottorin ohjauspaneelille syötettävää nopeusohjetta.

STOP -nappi ohjauspaneelin oikeassa yläreunassa pysäyttää ohjelman ja nolaa ulostulojännitteen. Mikäli ohjelman sammuttaa muulla tavalla, CompactRIO järjestelmän NI 9263 modulille jää ohjausjännitteen viimeisin arvo.



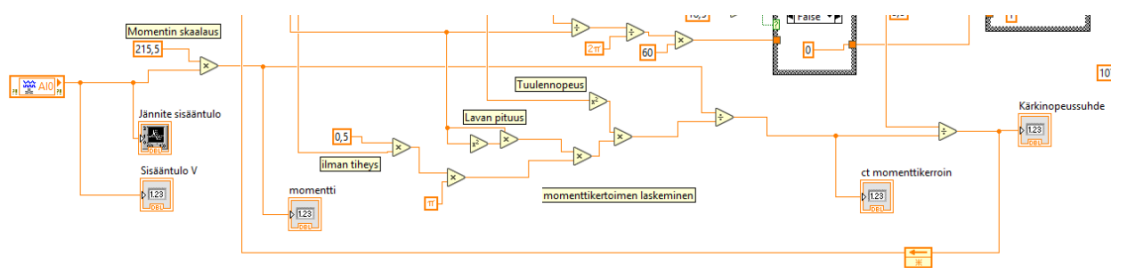
KUVA 11. Jännitteen skaalaus sekä ulostulon nollaus

Kuvassa 11 näkyy ulostulon nollaus. STOP -painiketta, joka näkyy kuvassa 10, nopeusohjeen ohjearvo muuttuu nolllaksi.



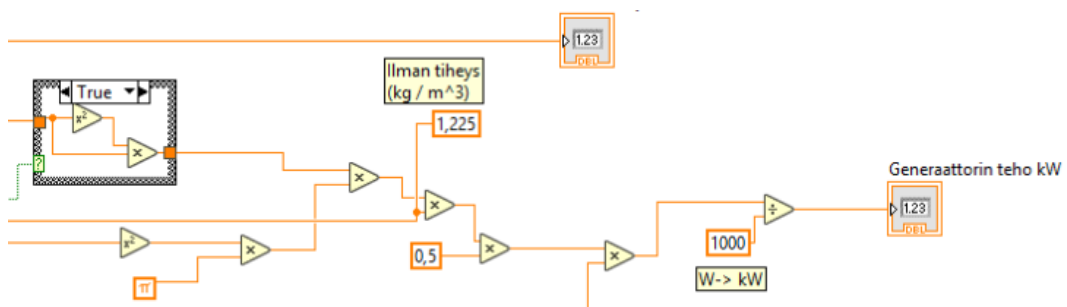
KUVA 12. Tuulennopeuden rajat

Kuvassa 12 näkyvät harmaan laatikot toteuttavat vertailun tuulennopeuden ja käynnistymisnopeuden sekä pysäytysnopeuden välillä. Mikäli tuulennopeus alittaa tai ylittää annetut rajat, generaattori ei pyöri.



KUVA 13. Momenttikertoimen ja kärkinopeussuhteen laskeminen

Kuvassa 13 on esitetty kärkinopeussuhteen laskeminen. Momenttikerroin saadaan lasketua kaavan 3 avulla. Kaavalla 5 lasketaan kärkinopeussuhde jakamalla tehokerroin c_p juuri lasketulla momenttikertoimella c_t . Laskettu kärkinopeussuhde syötetään kappalessa 4.1 esitettyyn tehokerroimen takaisinkytkentään.



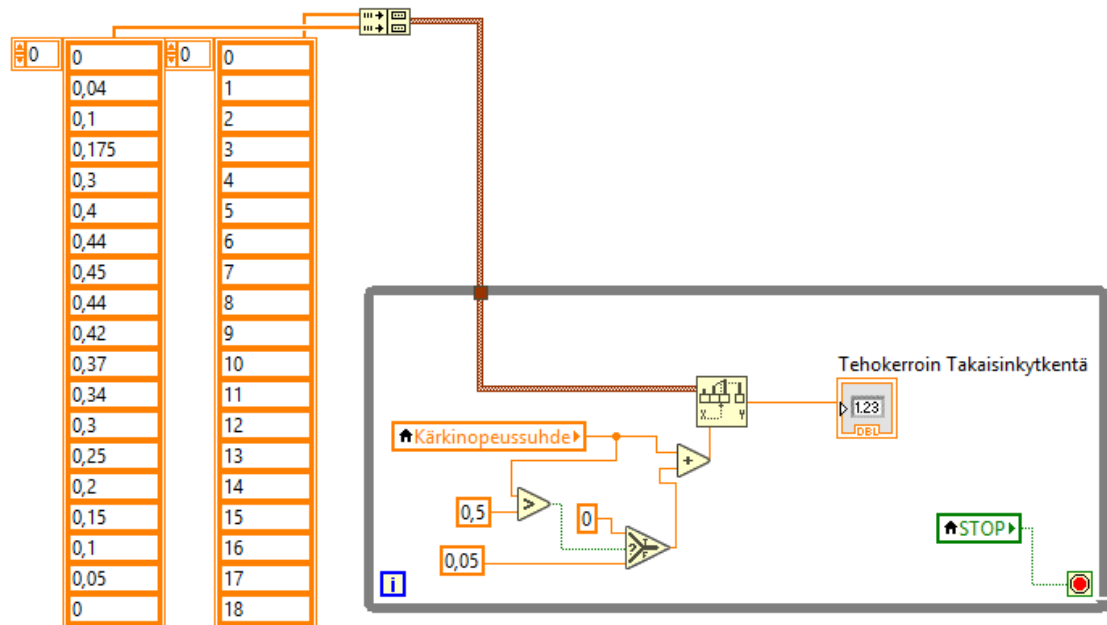
KUVA 14. Generaattorin tehon laskenta

Kuvassa 14 on esitetty generaattorin tehon laskeminen. Teho saadaan laskettua kaavalla 1. Tuulennopeuden on nostettu kolmanteen potenssiin laatikon sisällä, jolla suoritetaan tuulennopeuden vertaaminen asetettuihin raja-arvoihin. Lopuksi generaattorin teho muutetaan wateista kilowateiksi ja näytetään simulaatiomallin ohjauspaneelissa.

4 SIMULOINTIOHJELMA

4.1 Tehokertoimen takaisinkytkentä

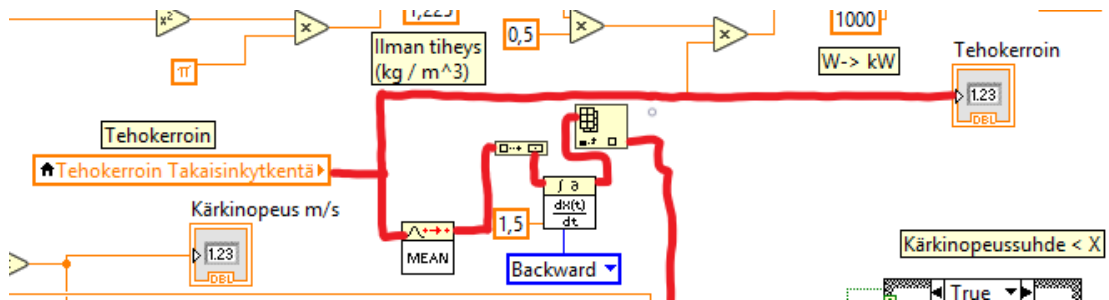
Toinen työn tavoitteista oli korjata tehokertoimen takaisinkytkentä. Kuvassa 15 on esitetty osa ohjelmasta, jolla tehokertoimen takaisinkytkentä on toteutettu. Tehokertoimesta luodaan käyrä kärkinopeussuhteen funktiona syöttämällä ne kuvan 15 vasemmassa reunassa näkyvään taulukkoon. Oikean puoleiseen taulukkoon samassa kuvassa syötetään kärkinopeussuhteen arvot, jotka vastaavat tehokerrointa. Taulukkojen arvot yhdistetään käyräksi. LabVIEWistä valmiiksi löytyvällä funktiolla käyrältä haetaan kärkinopeussuhdetta vastaava tehokerroin ja se syötetään paikallisena muuttujana ohjelman osaan, joka näkyy kuvassa 16.



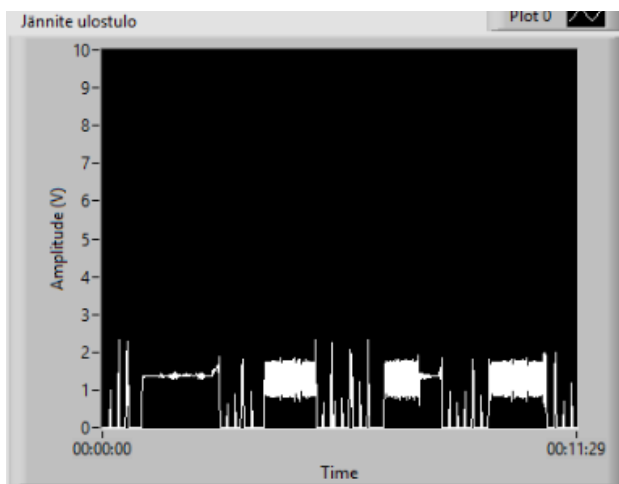
KUVA 15. Tehokerroin kärkinopeussuhteen funktiona

Koska ohjelmaan ei syötetä kärkinopeussuhteelle asetusarvoa, on takaisinkytkentä silmukkaan lisätty ylimääräinen vakio. Vakiolla lisätään 0,05 kärkinopeussuhteeseen ja kun kärkinopeussuhde kasvaa suuremmaksi kuin 0,5 vakion lisääminen lopetetaan. Näin simulointitulokset eivät vääristy yleisimmällä toiminta-alueella.

Tehokertoimen takaisinkytkennälle oli lisättävä suodin, koska ulostulojännitteessä esiintyi suuria värähtelyjä kuten kuvassa 16 on esitetty.

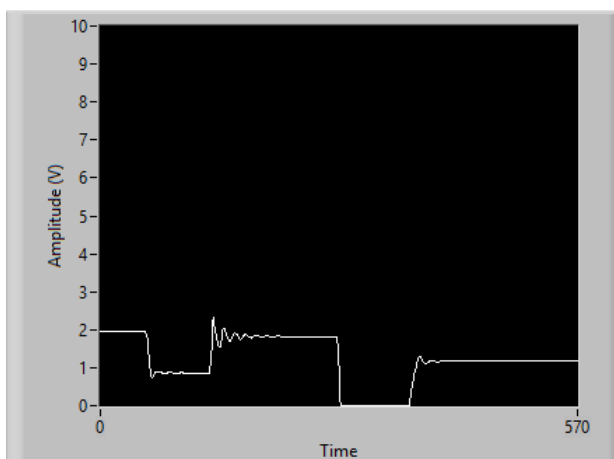


KUVA 16. Tehokertoimen suodin ja tehon lasku



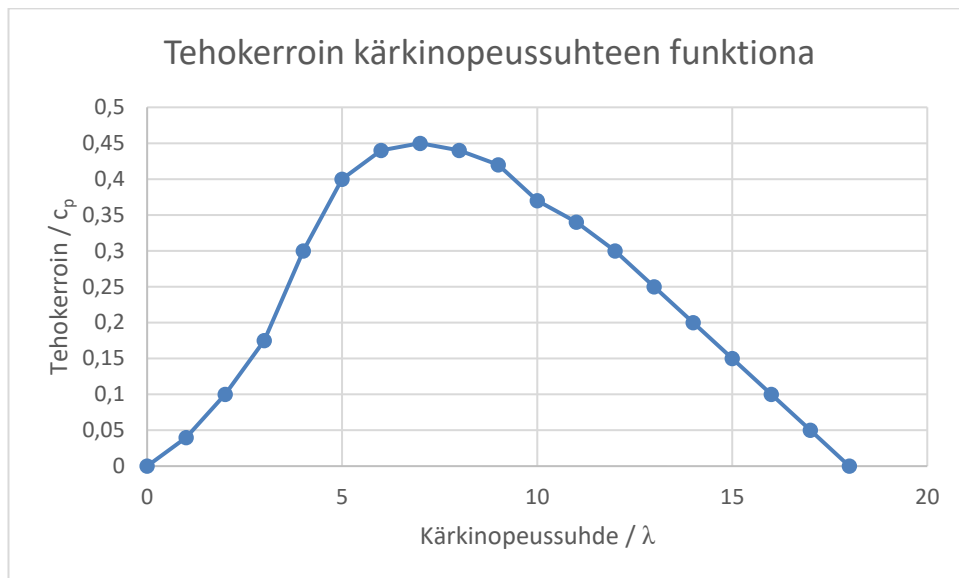
KUVA 17. Ulostulojännitteen värähtely

Suodin laskee tehokertoimen viimeisen 20 pisteelle keskiarvon. Keskiarvoa derivoidaan siinä esiintyvän värähtelyn vähentämiseksi. Kuvassa 18 on esitetty suotimen vaikutus ulostulo jännitteeseen.



KUVA 18. Ulostulo jännite suotimen jälkeen

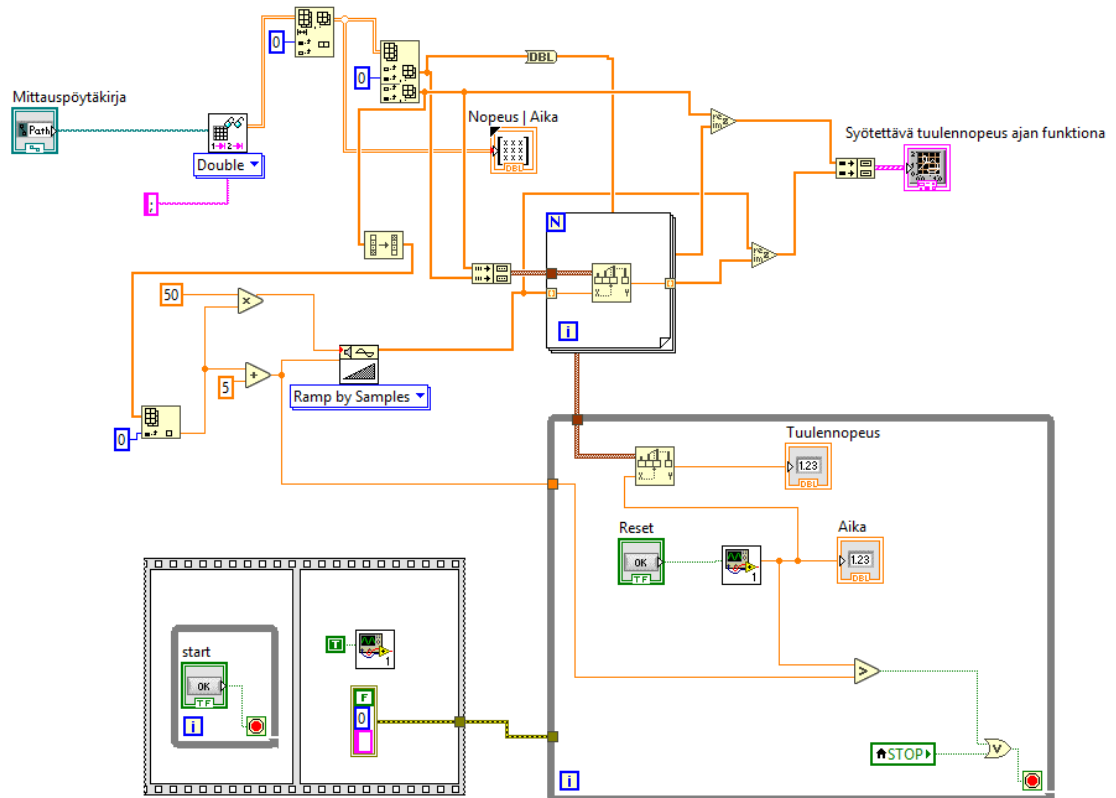
Kuviossa 1 on esitetty työssä käytetyn tehokertoimen ja kärkinopeussuhteen suhde. Tehokerroin on ominainen jokaiselle roottorityypille ja usein valmistaja ilmoittaa kyseiset arvot. Simulointiohjelman muuttaminen eri tuulivoimalalle onnistuu helposti vaihtamalla kuvassa 15 näkyvään vasemman puoleiseen taulukkoon uuden tuulivoimalan tehokerroimia vastaavat arvot.



KUVIO 1. Tehokerroin kärkinopeussuhteen funktiona

4.2 Mittausdatan lukeminen

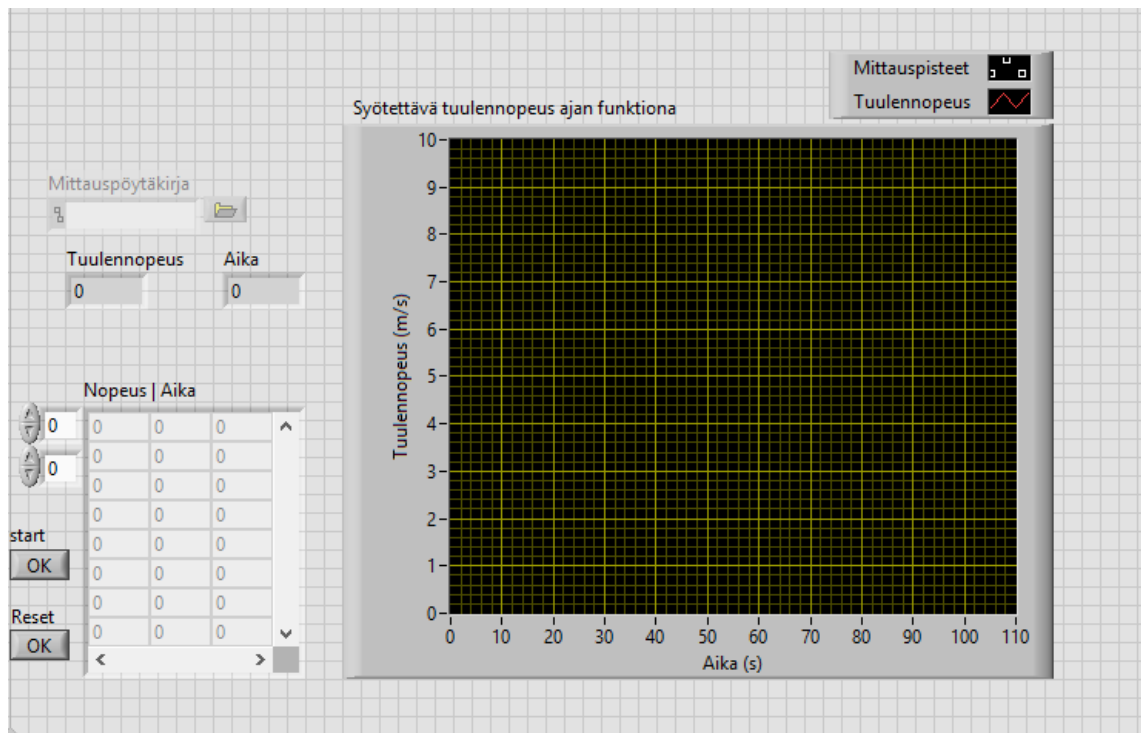
Toinen opinnäytetyön tavoitteista oli saada simulointimalliin ominaisuus, jolla voidaan simuloida tuotettua tehoa lukemalla tuulennopeus erillisestä tiedostosta. Kuvassa 19 on esitetty osuus ohjelmassa, jolla tiedon nouto erillisestä tiedostosta on toteutettu.



KUVA 19. Mittausdatan nouto

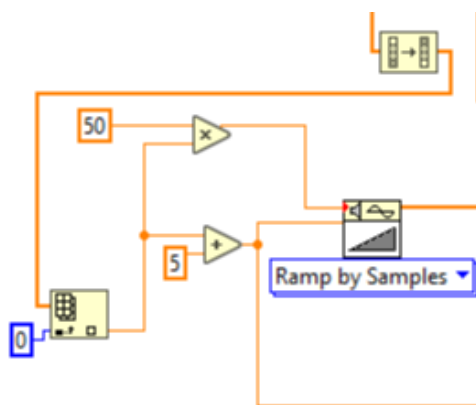
Ohjelma tukee .csv -tiedostomuotoa ja mittausdata tulee olla erotettu toisistaan puolipisteellä. Ohjauspaneelissa olevaan mittauspöytäkirja kohtaan haetaan tiedosto, josta simuloitava data halutaan.

Mittausdatan ohjauspaneelissa, kuvassa 20, näkyvään taulukkoon näkyviin mittauspöytäkirjasta ladattu data. Tämä mahdollistaa helpon vertailun simuloitavien mittauksien ja alkuperäisten välillä. Taulukon oikealla puolella sijaitsevasta kuvaajasta nähdään simuloitavat arvot mittauspisteiden välillä.



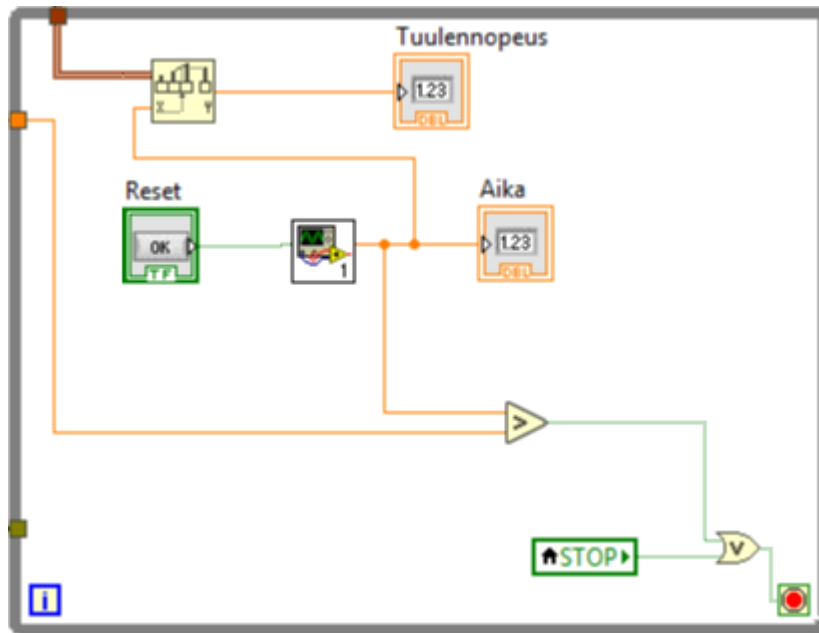
KUVA 20. Mittausdatan ohjauspaneeli

Mittauspisteiden välillä olevat arvot on saatu lineaarisella interpolaatiolla. Kuvassa 21 on esitetty osa ohjelmasta. Mittausdatasta muodostetun taulukosta irrotettu aika sarake käännetään ja viimeisen mittauspisteen avulla määritetään otoskoko. Alustavasti jokaista simuloitavaa sekuntia kohden lasketaan 50 kappaletta otoksia. Viimeisen mittausarvon syöttöä jatketaan 5 sekuntia, jonka jälkeen kuvassa 22 näkyvä aikojen vertailu pysäyttää silmukan.



KUVA 21. Interpolaation otoskoko

Kuvassa 22 on esitetty osa ohjelmasta, jolla lasketaan tuulennopeus tietyllä ajan hetkellä. Tuulennopeus ajan funktiona syötetään silmukkaan interpoloituna ja LabVIEWissä valmiiksi olevalla funktionalla ratkaistaan ajan hetkellä vallitseva tuulennopeus. Sekunteja laskeva funktio jouduttiin luomaan erikseen, koska valmis funktio aloittaa ajan laskun 1.1.1904, perjantai kello 00:00. Laskettu tuulennopeus syötetään paikallisena muuttujana takaisin ohjelman osaan, jossa lasketaan tuulivoimalan teho sekä pyörimisnopeus.



KUVA 22. Tuulennopeuden laskeminen ajan hetkellä

4.3 Simuloinnin tulokset

Simulointimallin toiminta tarkistettiin syöttämällä samat alkuarvot simulaatiomalliin kuin aikaisemmin kappaleessa kaksi kaavaan kolme sijoitetut arvot ja vertaamalla niitä keskenään.

| | | |
|-----------------------|-----------|------------------------------------|
| Tuulennopeus m/s | 10,0429 | |
| Generaattorin teho kW | 13,9111 | Generaattorin pyörimisnopeus (rpm) |
| | | 177,122 |
| Kärkinopeus m/s | 74,1928 | Kärkinopeussuhde |
| | | 7,38757 |
| Tehokerroin | 0,446074 | Tehokerroin Takaisinkytkentä |
| | | 0,446074 |
| ct momenttikerroin | 0,0402545 | |
| output V | 0,576671 | |

KUVA 23. Kuva simuloinnin tuloksista

Kuvassa 23 on esitetty simuloinnin tulokset, kun tuulennopeus oli 10 metriä sekunnissa ja roottorin lavan pituus 4 metriä. Tehokertoimen säätö tapahtuu muokkaamalla tuulivoimalan kokema kuormitusta. Kuormitusta säädettiin niin, että tehokertoimen arvoksi tuli noin 0,44.

Kuvasta 23 näkyvää generaattorin tehoa ja aikaisemmin laskettua tehoa, noin 14 kW, verratessa, huomataan tuloksien olevan hyvin lähellä toisiaan. Pienet erot selittyvät tehokertoimesta löytyvällä erolla.

5 POHDINTA

Työssä saavutettiin alun perin asetetut tavoitteet; momentinmittauksen takaisinkytkentä sekä mittausdatan syöttö ohjelmaan Excel -taulukosta. Takaisinkytkennän osalta en saavuttanut itselleni asettamaa tavoitetta, mutta resurssien puutteen vuoksi nykyiseen tulokseen on tyydyttävä. Tehokertoimen, jotka ovat osana momentinmittauksen takaisinkytkentää, laskemisessa käytetyt suotimet lisäsivät ohjaussignaaliin värähtelyä sekä ylimääräistä viivettä.

LabVIEW oli ohjelmointiympäristönä täysin vieras tätä työtä aloittaessa, vaikkakin graafinen ohjelmointi oli tullut MATLAB:n myötä tutuksi. Uskon, että olisin päätenyt parempaan tulokseen ja kompaktimpaan koodiin, mikäli LabVIEW:n käytöstä. Ohjelmointiympäristöön tuli perehdyttyä lähinnä verkosta löytyneillä videoilla sekä National Instrumentsin omilla foorumeilla. Itse ohjelman kirjoitus tapahtui yrityksen ja erehdyksen kautta.

Työn vaativuudesta huolimatta, ohjelmointi LabVIEW:llä oli mielenkiintoinen kokemus. Tulevaisuuden kannalta uskon, että suurin tästä työstä saatu hyöty liittyy tiedonhakuun ja ongelmanratkaisukykyyn.

LÄHTEET

VTT: Tuulivoima. Luettu 10.11.2018

<https://www.vtt.fi/palvelut/v%C3%A4h%C3%A4hiilinen-energia/tuulivoima>

America's first wind turbine generated electricity in 1888. Luettu 9.2.2019

<https://cleantechnica.com/2014/06/22/americas-first-wind-turbine-generated-electricity-1888/>

Timeline: The history of wind power. Luettu 9.2.2019

<https://www.theguardian.com/environment/2008/oct/17/wind-power-renewable-energy>

Savonius-roottori. Luettu 3.2.2019

<http://www.juggaar.com/2015/05/savonius-wind-turbine.html>

Tuulivoimahankkeet Suomessa. Luettu 8.2.2019

<http://www.tuulivoimayhdistys.fi/hankelista>

Haapanen, E. Tuulivoimatekniikka.ppt, luentomateriaali. Luettu 24.11.2018

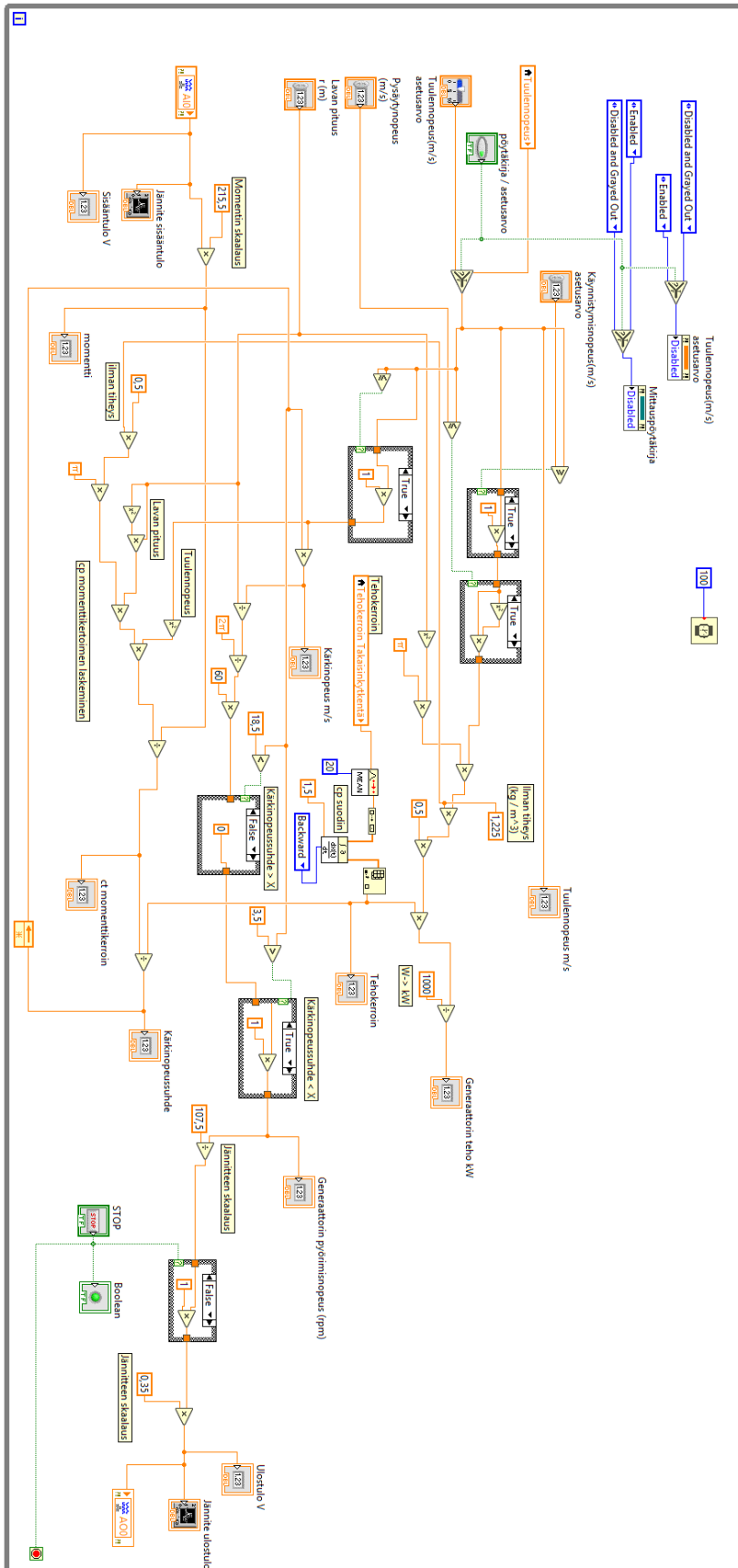
Tuulivoima Suomessa, Tuulivoimayhdistys. Luettu 24.11.2018

<http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoima-suomessa-ja-maailmalla/tuulivoima-suomessa>

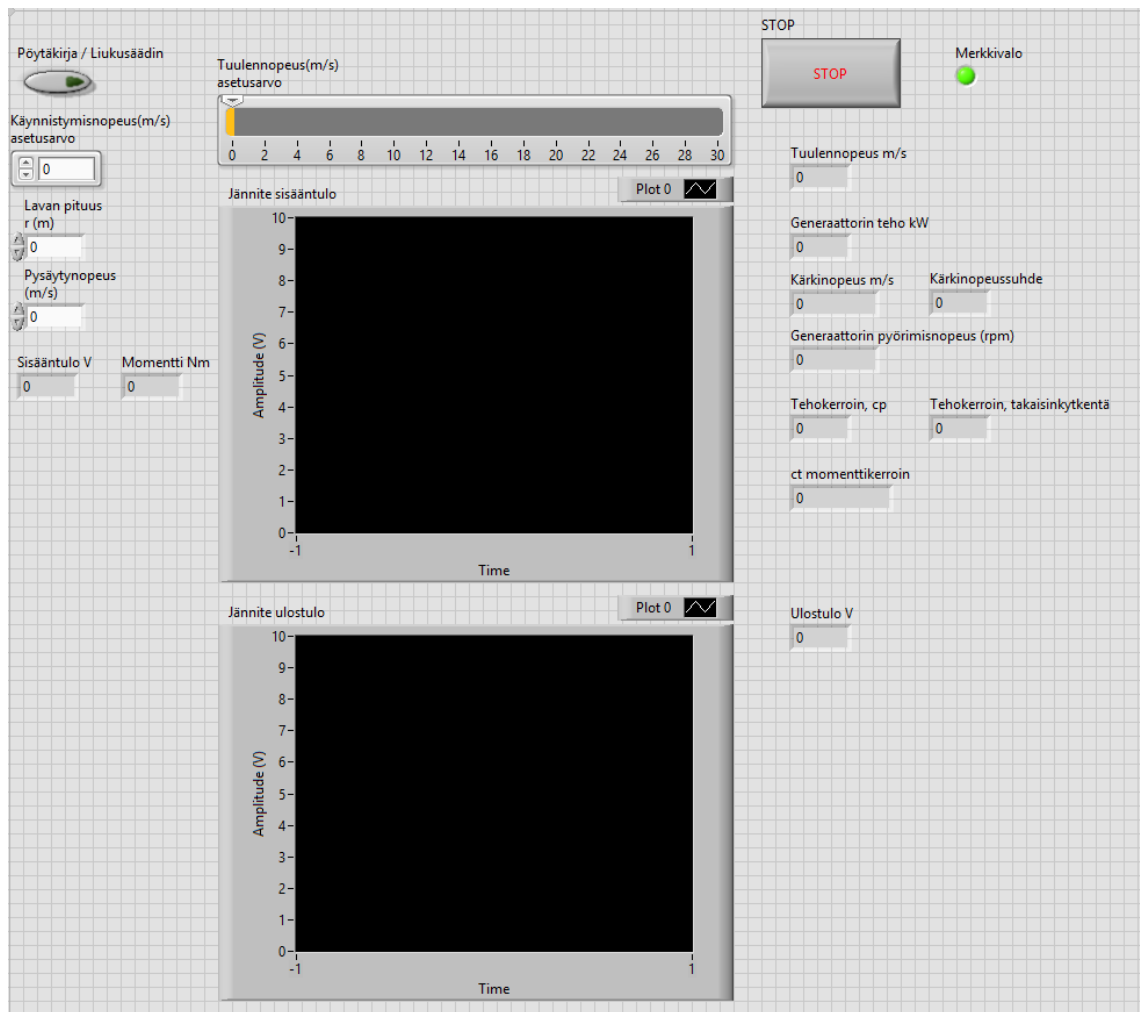
Mäkelä, M. 2012. Tekniikan kaavasto. AMK-Kustannus Oy

LIITTEET

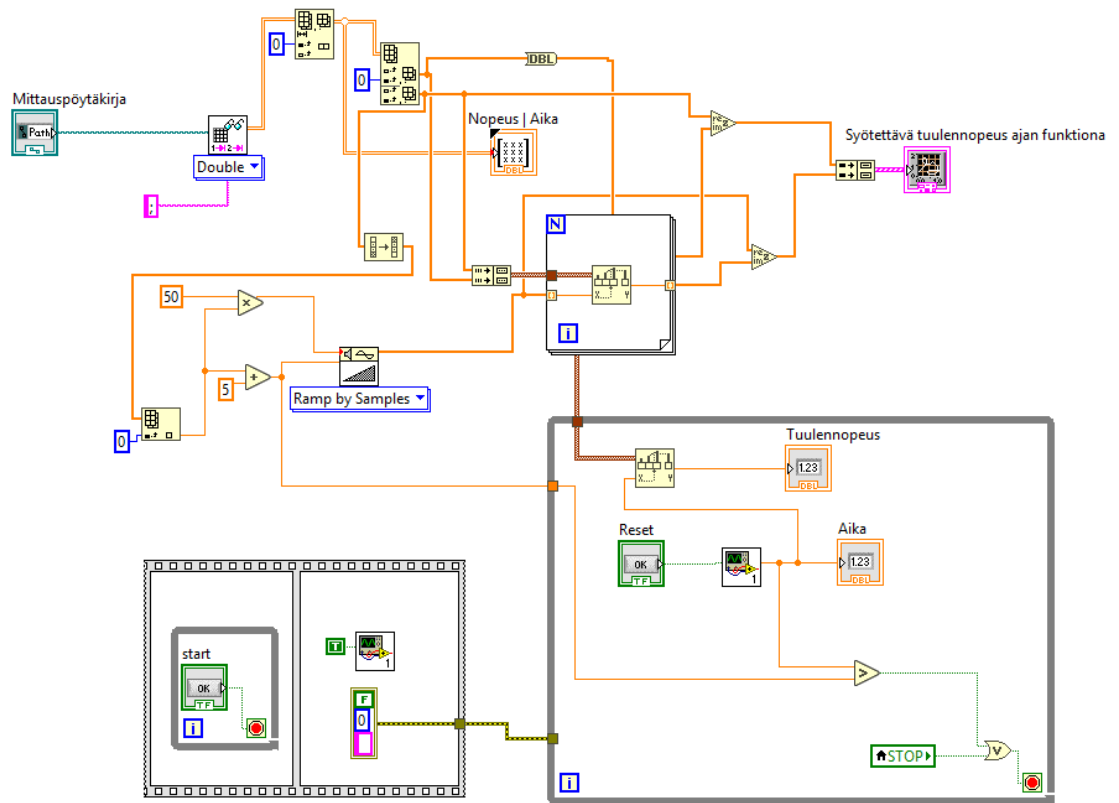
Liite 1. Ohjelmointikoodi



Liite 2. Ohjauspaneeli



Liite 3. Mittauspöytäkirjan luku



Liite 5. Tehokerroin tuulennepeuden funktiona

