



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

Tuulivoimalan simulointi laboratorioympäristössä

Hannu Oksanen

Opinnäytetyö
Toukokuu 2016
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

OKSANEN, HANNU:
Tuulivoimalan simulointi laboratorioympäristössä

Opinnäytetyö 34 sivua, joista liitteitä 1 sivua
Toukokuu 2016

Tämä opinnäytetyö on tehty Tampereen ammattikorkeakoulun sähkölaboratorioon. Työn tarkoituksena oli tehdä muuttuvanopeuksista tuulivoimalaa simuloiva järjestelmä. Työssä käytetyt laitteet olivat koulun sähkölaboratorioon kuuluvia, ja työ on tehty niiden mukaisesti.

Työn tärkeimpänä osana oli muuttuvanopeuksisen tuulivoimalan roottorin pyörimisnopeuden muuttuminen kuormitustilanteen muuttuessa. Kun kuormitus kasvoi, pyörimisnopeus hidastui. Tuulivoimalan roottorin mallintamiseen käytettiin taajuusmuuttajaohjattua servomootoria. Servomootorille vietiin nopeusohje aiemmassa työssä servomootorin käyttöpaneeliin lisättyihin ulkoisen nopeusohjeen liitäntöihin. Mittaussignaali saatiin servomootorin käyttöpaneelin momenttimittauksen liitännöistä.

Servomootorin ohjaus on toteutettu National Instrumentsin myDAQ -laitteella. NI myDAQ on pienikokoinen, erityisesti opiskelijoiden käyttöön suunnattu signaalien käsittelytyökalu. Sillä saadaan vietyä ± 10 voltin ohjausjännite sekä tuotua ± 10 voltin mittausjännite. Servomootorin ohjauksessa käytetty ohjelmisto on tehty LabVIEW-ohjelmistolla. Se on graafinen ohjelmointiympäristö, joka tekee ohjelman lisäksi käyttöliittymää, jolla ohjelmaa käytetään. Käyttöliittymään syötetään halutut simulointiarvot esimerkiksi tuulennopeudelle ja roottorin säteelle.

Asiasanat: tuulivoimala, simulointi, servomootori, labview, ohjelmointi

ABSTRACT

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

OKSANEN, HANNU:

Wind Turbine Simulation in Laboratory Environment

Bachelor's thesis 34 pages, appendices 1 pages
May 2016

This thesis was made for the electric laboratory in Tampere University of Applied Sciences. The purpose of this thesis was to make a system that simulates a variable speed wind turbine. Devices that were used for this thesis are property of the electric laboratory, and the study was made accordingly.

The most important element of this thesis was changing the rotation speed of a variable speed wind turbine when the load of the turbine changes. When the load increased the rotation speed decreased. In the modelling of the wind turbine a frequent changer controlled servomotor was used. The speed reference for the servomotor was taken to connectors for external speed reference that were added to the servomotors control panel in earlier thesis. The measurement signal was acquired from the torque measurement connectors in the control panel.

The control of servomotor is executed with the National Instruments myDAQ -device. The NI myDAQ device is a portable data acquisition device that is made especially for students. It can export ± 10 V control voltage as well as import ± 10 V measuring voltage. The software that was used to control the servomotor was made with LabVIEW software. LabVIEW is a graphic programming environment that makes program and user interface at the same time. Desired simulating values are supplied to user interface, for example, the wind speed and the radius of the rotor.

Key words: wind turbine, simulating, servomotor, labview, programming

SISÄLLYS

JOHDANTO.....	6
1 TEORIAA JA TAUSTATIETOA.....	7
1.1 Tuulivoiman historiaa	7
1.2 Tuuli energianlähteenä	9
1.2.1 Yleistä tuulivoimasta	9
1.2.2 Tuulivoiman kehitys Suomessa.....	9
1.3 Tuuliturbiinit.....	11
1.3.1 Vaaka-akselinen tuulivoimala	11
1.3.2 Pystyakseliset tuuliturbiinit.....	13
1.4 Tuulivoimatekniikan perusteita	15
2 TUULIVOIMAN SIMULOIMINEN LABORATORIOSSA	18
2.1 Servomoottori	18
2.2 Oikosulkumoottori	20
2.3 NI myDAQ	21
2.4 LabVIEW	22
2.5 Simuloinnin tulokset	27
3 POHDINTA	32
LÄHTEET	33
LIITTEET.....	34
Liite 1. LabVIEW:lla tehty ohjelma.....	34

LYHENTEET JA TERMIT

A	Roottorin pyyhkäisyypinta-ala, m ²
c_p	Tuulivoimalan tehokerroin
c_t	Tuulivoimalan momenttikerroin
E	Sähköenergia, kWh
LabVIEW	Graafinen ohjelmointiympäristö
n	Roottorin pyörimisnopeus, rpm
Napakorkeus	Tuulivoimalan roottorin navan korkeus maanpinnasta
NI myDAQ	signaalien käsittelytyökalu
P	Teho, W
Roottori	Tuulivoimalan lapojen ja navan muodostama osa
T	Momentti, Nm
Turbiini	Laite joka muuttaa liike-energian pyörimisenergiaksi
$v_{kärki}$	Roottorin lavan kärjen kehänopeus, m/s
v_{tuuli}	Tuulenopeus, m/s
λ	Kärkinopeussuhde, tuulenopeuden ja lavan kärjen kehänopeuden välinen suhde
ρ	Ilman tiheys, kg/m ³

JOHDANTO

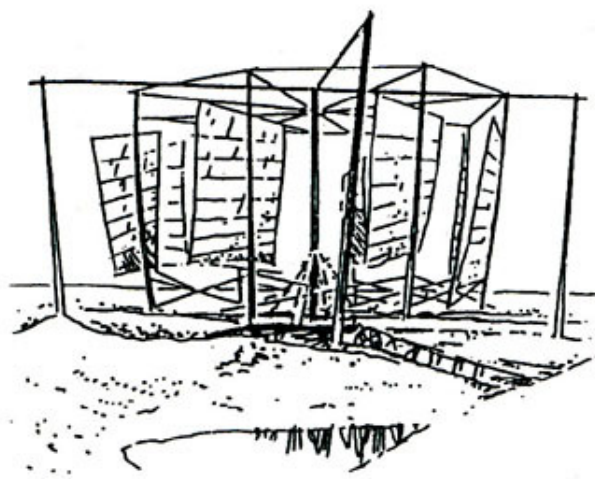
Tuulivoima on nopeasti kasvava sähköenergian tuotantomuoto. Siihen panostetaan, koska halutaan vähentää riippuvuutta fossiilisilla polttoaineilla tuotetusta energiasta. Se on ekologista, sillä tuotantovaiheessa se ei tuota lainkaan hiilidioksidipäästöjä. Tuulivoimalla tuotetaan noin 1 % maailman sähköstä. Vuoden 2012 loppuun mennessä asennetuilla tuulivoimaloilla tuotetaan normaalina tuulivuonna noin 7 % Euroopan sähkönkulutuksesta. Euroopan tuulivoimantuottajien edunvalvontajärjestö, EWEA, ennustaa että tuulivoimalla tuotetaan noin 13 % Euroopan sähköstä vuoteen 2020 mennessä. (EWEA, 2012)

Opinnäytetyö tehtiin Tampereen ammattikorkeakoulun sähkölaboratorioon. Työssä tehtiin LabVIEW -ohjelmoinnilla simulaatio tuulivoimalan roottorin käyttäytymisestä. Roottoria simuloi servomoottori jota kuormitettiin taajuusmuuttajaohjatulla oikosulkumoottorilla.

1 TEORIAA JA TAUSTATIETOA

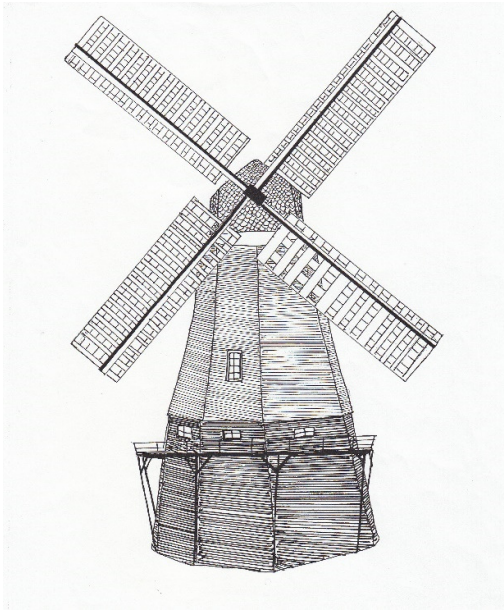
1.1 Tuulivoiman historiaa

Ihminen on käyttänyt tuulta hyödyksi tuhansia vuosia. Ensimmäisenä tuulta hyödynnettiin laivojen purjeissa. Muuhun tuulta on käytetty energianlähteenä Persiassa jo 600-luvulla ennen ajanlaskun alkua, jolloin siellä käytettiin pystyakseloituja tuulimyllyjä veden pumppaamiseksi pelloille. Ensimmäinen tunnettu kirjallinen viittaus tuulimyllyyn on kuitenkin vasta yli tuhat vuotta myöhemmin, vuodelta 644. Tuulimyllyn keskeisimmät käyttökohteet olivat veden nostaminen ja viljan jauhaminen. Kuvassa 1 on esitettyinä piirros persialaisesta pystyakselisesta tuulimyllystä. (Lindell, 2010. s. 329)



KUVA 1. Persialainen tuulimylly (Murdochin yliopisto)

Välimeren maissa tuulimyllyjä on käytetty noin 1000-luvulta alkaen ja Euroopassa ne yleistyivät 1100-luvulta lähtien. 1200-luvulla Euroopassa kehitettiin vaaka-akselisia tuulimyllyjä, joissa oli yleensä 4-, mutta joskus jopa 16-lapainen roottori. 1500-luvulla kehitettiin ns. hollantilaistyyppinen tuulimylly. Siinä saatiin käännettyä tuulen suuntaan pelkkää myllyn yläosaa, kun aiemmissa vaaka-akseloiduissa tyypeissä piti kääntää koko rakennusta. Ensimmäisiä vaaka-akseloituja myllyjä ei pystytty kääntämään lainkaan tuulensuuntaan, vaan ne olivat kiinteästi yleisimmän tuulensuunnan mukaisesti. Kuvassa 2 on esitettyinä vaaka-akselinen tuulimylly. (Lindell, 2010. s. 330)



KUVA 2. Vaaka-akselinen tuulimylly (Glanting, Peter. 2012)

Vanhoissa tuulimyllyissä myllyn lavat pyörivät tuulen painevaikutuksen ansiosta. Nykyisissä kolmilapaisissa tuulivoimaloissa pyörimisen aiheuttaa lapojen aerodynaamisen muotoilun ansiosta syntyvä nostevoima. Lavat ovat siis muotoiltu profiililtaan hieman samaan tapaan kuin lentokoneen siivet.

1.2 Tuuli energianlähteenä

1.2.1 Yleistä tuulivoimasta

Tuuli syntyy kun aurinko lämmittää maanpintaa ja ilmaa. Lämmennyt ilma kohoaa ylöspäin aiheuttaen maanpinnalle paineen alenemisen. Paine tasoittuu, kun ympäriltä liikkuu viileämpää ilmassaa tilalle. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen, 2008, s. 280)

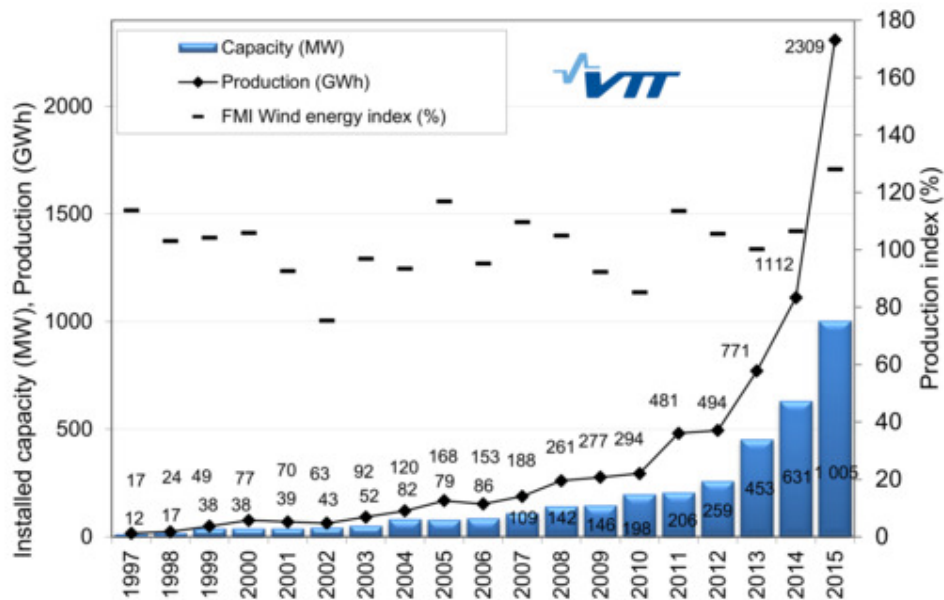
Tuuli on energianlähteenä ympäristöystävällinen, sillä rakentamisen jälkeen tuulivoimalaitokset eivät tuota lainkaan hiilidioksidi- tai muita kasvihuonekaasupäästöjä. Tuulivoimalaitoksien suurimpia haittoja ovat maisemalliset haitat, sillä korkeat voimalaitokset näkyvät kauas. Lisäksi lähempänä voimalaitoksia ilmenee myös meluhaittoja jotka syntyvät mekaanisten osien liikkeestä. Lapojen liike on suurin melua aiheuttava yksittäinen osio. Näitä haittoja ehkäistään sijoittamalla voimalaitoksia merelle ja muutenkin maastoa mukailten. Meluohjearvo taajamissa on 40 desibeliä, jonka yksittäinen tuulivoimala ylittää keskimääräisellä noin 8 m / s tuulella noin 200 – 300 metrin etäisyydellä. (Huhtinen. ym. 2008, s. 280)

Tuulivoiman suurimpia ongelmia on tuotannon vaihtelevuus olosuhteista riippuen, joten tuulivoima ei käy ainoaksi energiantuotantomuodoksi vaan sitä pitää tukea muilla energiantuotantomuodoilla. Tuulivoiman tuottaminen Suomessa on taloudellisesti kannattavinta rannikolla rantaviivan läheisyydessä sekä sisämaassa korkeiden tuntureiden ja vaa-rojen huipuilla. Parhaat tuuliolosuhteet ovat Ahvenanmaalla ja Varsinais-Suomen saaristossa. (Huhtinen. ym. 2008, s. 280)

1.2.2 Tuulivoiman kehitys Suomessa

Vuoden 2015 lopussa Suomen tuulivoimakapasiteetti oli 1005 megawattia ja voimaloita oli yhteensä 387. Tuulivoimalla tuotettu osuus koko Suomen sähkönkulutuksesta oli noin 2,8 % eli noin 2,3 terawattituntia. Vuoden 2014 vastaaviin lukuihin tuli nousua huomattavasti. Vuoden 2014 lopussa kapasiteettia oli 631 megawattia ja voimaloita oli 268 kappaletta. Sähkönkulutuksesta tuulivoimalla tuotettu osuus oli noin 1,3 % eli noin 1,1 terawattituntia. (Suomen tuulivoimatilastot)

Kuviossa 1 on esitettyä Suomen tuulivoimatuotannon kehitys vuosina 1997 - 2015. Kuviossa nähdään että tuulivoimaa on alettu rakentamaan isommassa mittakaavassa vasta 2010- luvulla. Tämä johtuu siitä että uusiutuvalla energialla tuotetulle sähkölle alettiin maksamaan tuotantotukea eli syöttötariffia vuonna 2011. Tukia maksetaan jotta saavutettaisiin Suomen tavoite tuottaa uusiutuvilla energialähteillä 38 prosenttia energiasta vuonna 2020. (Motiva)



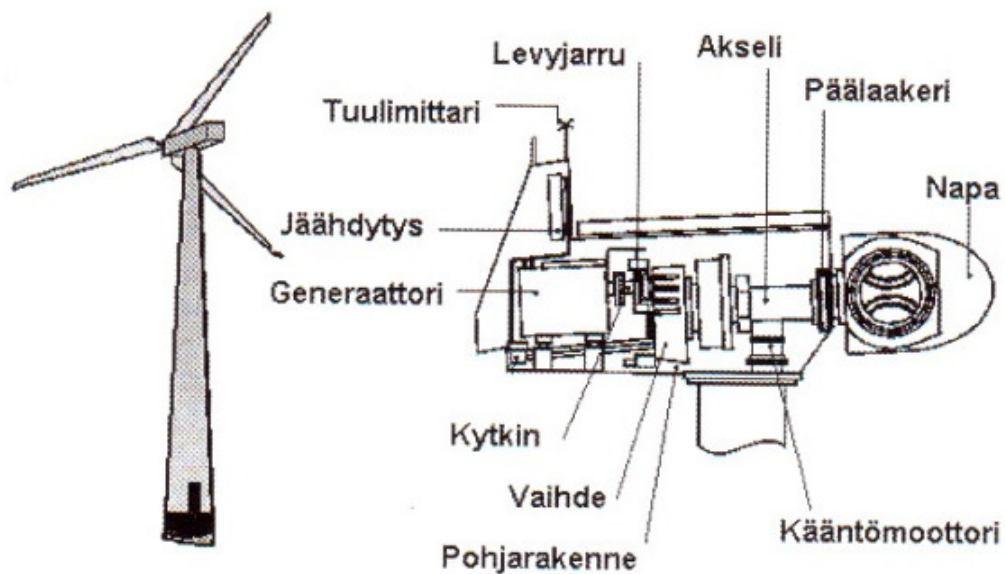
KUVIO 1. Suomen tuulivoimatuotannon kehittyminen (Suomen tuulivoimatilastot)

1.3 Tuuliturbiinit

Tuulivoimalalla tuulen liike-energia muutetaan sähköksi. Erilaisia tuulivoimalatyyppejä on useita erilaisia, mutta ainoa tyyppi millä on käytännön merkitystä sähköntuotannossa, on kolmilapainen vaaka-akselinen (potkurimallinen) voimala. Muita käytössä olevia tyyppejä ovat pystyakseliset kuppiroottori-, Savonius-roottori-, spiraaliroottori-, sekä Darrieus-roottorilaitokset. (Huhtinen. ym. 2008, s. 281)

1.3.1 Vaaka-akselinen tuulivoimala

Potkurimalliset eli kolmilapaiset vaaka-akseliset tuulivoimalat ovat suurimmaksi osaksi syrjäyttäneet kaikki muut tuulivoimalatyypit ja ovat käytännössä ainut laitostyyppi mitä tuulienergiantuotannossa käytetään. Kuvassa 3 on esitettyä periaatekuva potkurimallista tuulivoimalasta sekä voimalan koneiston rakenteesta.



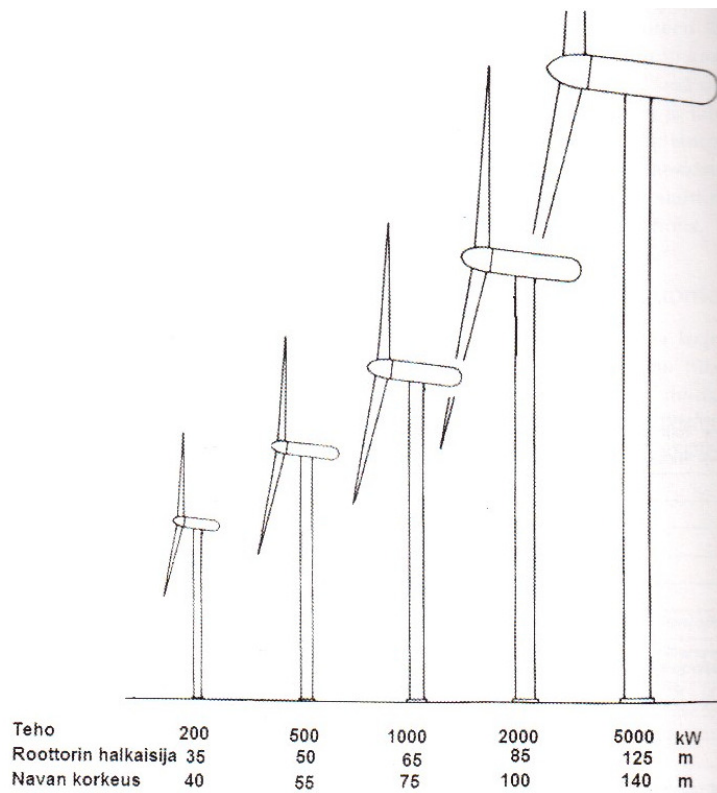
KUVA 3. Potkurimallinen tuulivoimala (Huhtinen ym. 2008. s. 282)

Potkurimalliset tuulivoimalat ovat korkeita, nykyään rakennettavien voimalaitosten napakorkeus on yli 100 metriä. Korkeissa voimalaitoksissa on etuna se, että tuulenoisuus on suurempi kuin maanpinnalla. Myöskään tuulen pyörteilystä ei ole niin paljon haittaa kuin matalammalla. Korkeudesta on kuitenkin myös haittaa, sillä laitojen koneisto sijaitsee myös korkealla, mikä hankaloittaa huoltotöitä.

Korkeisiin voimalaitoksiin saadaan pitkät lavat, joiden ansiosta roottorin halkaisija on erittäin suuri, suurimmissa reilusti yli 100 metriä. Potkurimallisen voimalaitoksen merkittävin etu on se, että pyöriessään roottori peittää todella paljon omaa pinta-alaansa suuremman alan. Näin ollen se pystyy tuottamaan omaan painoonsa nähden erittäin paljon tehoa. Nämä voimalaitokset tarvitsevat kääntöjärjestelmän, joka pitää roottorin aina suunnattuna tuulta kohti. Tällöin tuuli kohtaa roottorin aina kohtisuoraan, jolloin siitä saadaan eniten tehoa. Tuulivoimalat ovat teknisesti luotettavia, automatisoituja ja kauko-ohjattuja. Näin ollen ne eivät vaadi miehitystä, vaan niitä voidaan valvoa etäältä. Samasta valvomosta voidaan valvoa useita kaukana toisistaan olevia voimalaitoksia. Yleensä tuulivoimalaitosten käyttöikä on noin 20 - 25 vuotta. (Huhtinen. ym. 2008, s. 281)

Luonnollisesti tyynellä tuuliturbiinit eivät tuota sähköä. Käynnistyäkseen tuulivoimala vaatii tuulenoisuudeksi vähintään 3 metriä sekunnissa. Tuulenoisuuden ollessa välillä 3-15 m/s vaihtelee turbiinin teho tuulenoisuuden mukaan. Tuulenoisuuden ollessa noin 12–15 m/s turbiini saavuttaa nimellistehonsa, riippuen turbiinista. Nimellistehonsa saavutettuaan voimalaitos tuottaa nimellistehoa kunnes tuulenoisuus kasvaa noin 25 metriin sekunnissa. Tällöin turbiini pakotetaan pysähtymään sen rakenteisiin kohdistuvien suurien voimien vuoksi. (Huhtinen. ym. 2008, s. 281)

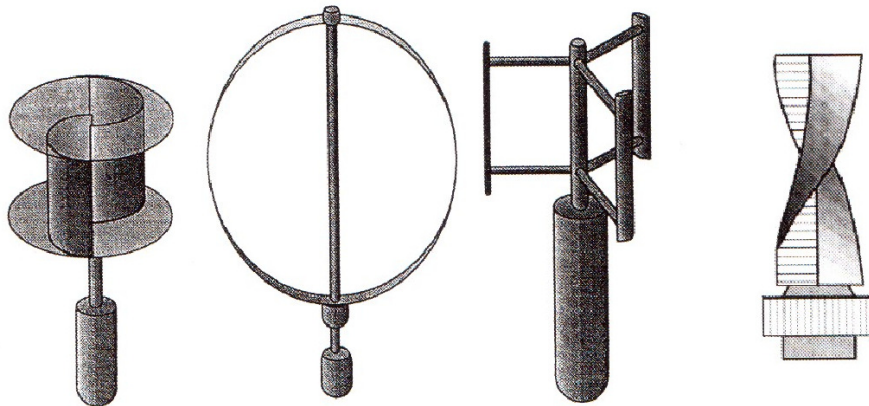
Tuulivoimalaitosten koko kasvaa niiden nimellistehojen kasvaessa. Kuvassa 4 on esitettyä eri tehoisten tuulivoimalaitosten suuntaa antavat kokoluokat.



KUVA 4. Vaaka-akselisten tuulivoimaloiden kokoluokat (Huhtinen ym. 2008. s. 282)

1.3.2 Pysty akseliset tuuliturbiinit

Pysty akselisiä tuuliturbiineja on monia erilaisia. Kuvassa 5 on esitettyä neljä erilaista pysty akselista tuuliroottoria. Ne ovat vasemmalta oikealle Savonius-, Darrieus-, Darrieus H- sekä spiraaliroottorit.



KUVA 5. Pysty akselisiä tuuliroottoreita (Huhtinen ym. 2008. s. 283)

Savonius-roottori kehitettiin Suomessa 1920-luvulla. Sen etuina on kohtuullinen hyötysuhde sekä riippumattomuus tuulensuunnasta. Tämän vuoksi voimala ei tarvitse kääntöjärjestelmää kuten vaaka-akseliset voimalat. Savonius-tyyppisen roottorin haittoina ovat epätasainen käynti ja roottorin asennon mukaan vaihteleva käynnistysmomentti. Lisäksi Savonius-roottorin tukirakenteita ja laakereita rasittavat voimakkaat poikittaisvoimat. Tämä aiheuttaa ongelmia suurissa laitoksissa. Spiraaliroottori on kehitetty Savonius-roottorista. Kyseisestä roottorimallista on saatu pois Savonius-roottorin ongelmat epätasaisesta käynnistä sekä vaihtelevasta käynnistysmomentista. (Huhtinen ym. 2008, s. 283)

Darrieus-roottorin generaattori ja vaihteisto sijaitsevat maan tasolla. Tämän vuoksi sen huoltotyöt ovat huomattavasti helpommat kuin vaaka-akselisen voimalaitoksen. Kuten Savonius-roottori, myös Darrieus-roottori on riippumaton tuulensuunnasta, joten sekään ei tarvitse erillistä kääntöjärjestelmää. Suurimpana haittapuolena kyseisessä roottorissa on sen mekaaninen kestävyys. Sen rakenteeseen aiheutuu todella suuria väsytysoimia, minkä vuoksi Darrieus-roottoria ei enää käytetä kaupallisissa sovelluksissa. Toinen haittapuoli kyseisessä roottorissa on sen huono käyntiinlähtökyky, minkä vuoksi se tarvitsee esimerkiksi sähkömoottorin apua saavuttaakseen alkunopeuden. (Huhtinen ym. 2008, s. 283)

1.4 Tuulivoimatekniikan perusteita

Kolmilapaisen vaakaakselisen tuulivoimalan roottorille saadaan laskettua tuulen antama teho P watteina kaavalla 1.

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

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

Saksalainen fyysikko Albert Betz osoitti vuonna 1926 että suurin mahdollinen hyötysuhde c_p tuuliturbiinille on $16/27$ eli noin 59,3 prosenttia. Tämä on ideaalisen tuuliturbiinin hyötysuhde. Todellisuudessa turbiinien hyötysuhde on alhaisempi, sillä esimerkiksi tuulen pyörteisyys, vaihteisto ja generaattori aiheuttavat häviöitä. Parhaimmillaan tuuliturbiinin hetkittäinen hyötysuhde voi olla noin 45 - 50 %. (Suomen tuuliatlas, Suomen tuulivoimayhdistys)

Esimerkiksi kuvassa 4 olevan viiden megawatin tuulivoimalalle tuulen antama teho tuulennopeuden ollessa seitsemän metriä sekunnissa on kaavalla 1 laskettuna:

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{tuuli}^3 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot c_p \\ P &= \frac{1}{2} \cdot 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(7 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3 \cdot \pi \cdot (62,5 \text{ m})^2 \cdot 0,35 \\ P &= 883941 \text{ W} \approx 900 \text{ kW} \end{aligned}$$

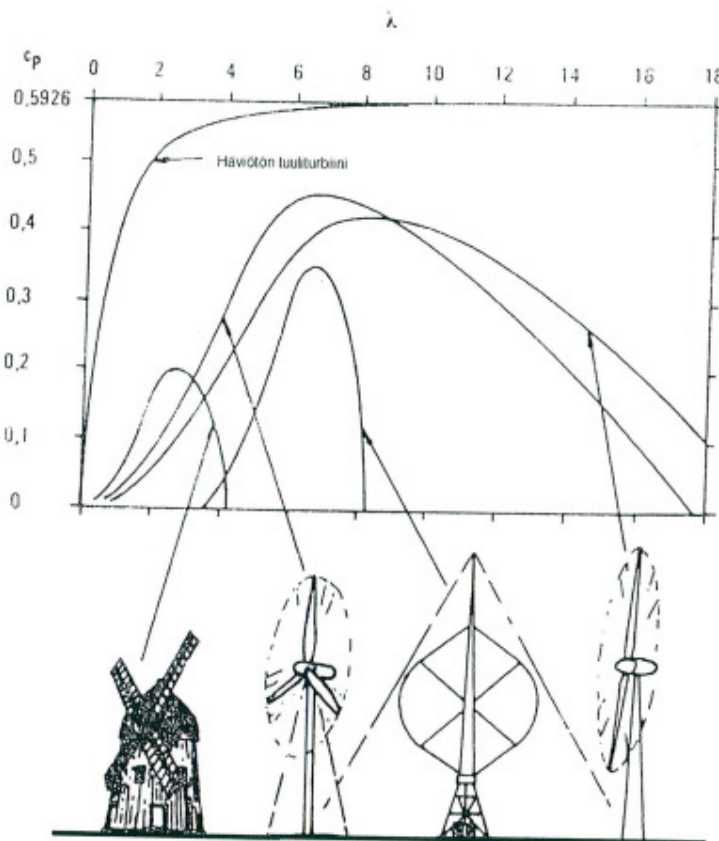
Esimerkissä oletetaan ilman tiheyden olevan $1,2 \text{ kg/m}^3$ ja tuulivoimalan roottorin tehokerroimen olevan 35 %. Kuten tuloksesta huomataan, ei teho ole lähelläkään voimalan nimellistä 5 megawatin tehoa. Jos tuulennopeus olisi 12 metriä sekunnissa, olisi tehoksi tullut noin 4,5 megawattia, eli lähes nimellisteho.

Esimerkissä tehokerroin oli 35 %, mutta tehokerroin riippuu voimalan kärkinopeussuhteesta λ , joka voidaan laskea kaavalla 2.

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

jossa $v_{kärki}$ on roottorin lavan kärjen kehänopeus metreinä sekunnissa ja v_{tuuli} on tuuleno-
peus metreinä sekunnissa.

Aluksi tehokerroin kasvaa kärkinopeussuhteen pienentyessä. Kun tehokerroin saavuttaa huippuarvonsa, alkaa se pienentyä kärkinopeussuhteen edelleen pienentyessä. Kuviossa 2 on esitettyä erilaisten tuulivoimaloiden tehokertoimia kärkinopeussuhteen λ funktiona. Kärkinopeussuhde λ on suhdeluku joka kertoo kuinka paljon suurempi roottorin kehänopeus on kuin tuuleno-
peus, eli kertomalla tuuleno-
peus kärkinopeussuhteella saadaan kärkinopeus. Kuvion 2 mukaisen kolmilapaisen tuulivoimalan tehokerroin on suurimmil-
laan kun kärkinopeussuhde on noin 7. Tällöin tehokerroin on noin 45%.



KUVIO 2. Tehokerroinkäyriä (Huhtinen ym. 2008. s. 285)

Tehokertoimen c_p ja kärkinopeussuhteen λ avulla saadaan laskettua momenttikerroin c_t . Momenttikerroin on tehokertoimen tapaan riippuvainen kärkinopeussuhteesta λ . Momenttikerroin on tehokertoimen ja kärkinopeussuhteen suhde ja se lasketaan kaavalla 3.

$$c_t = \frac{c_p}{\lambda} \quad (3)$$

Teho- ja momenttikertoimien käyrät esitetään usein samassa kuvaajassa, aseteltuna siten että tehokäyrä on x-akselin yläpuolella ja momenttikäyrä sen alapuolella.

Voimalaitoksen tuottama momentti T voidaan laskea kaavan 4 avulla.

$$T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot R^3 \cdot \pi \cdot v_{tuuli}^2 \cdot c_t \quad (4)$$

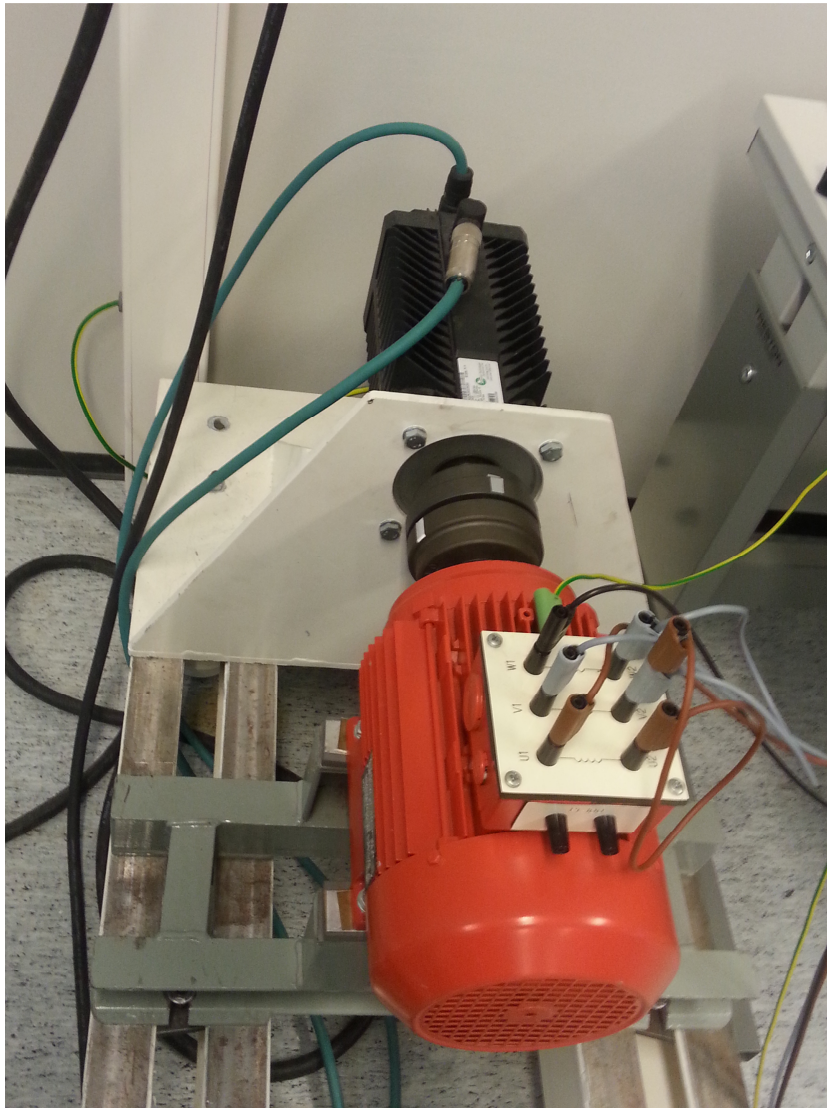
jossa ρ on ilman tiheys kilogrammoina kuutiometrissä, v_{tuuli} on tuulennopeus metreinä sekunnissa, R on roottorin säde (eli lavan pituus) metreinä ja c_t on roottorin momenttikerroin.

Momentin sekä tehon laskukaavat ovat siis hyvin samanlaiset.

2 TUULIVOIMAN SIMULOIMINEN LABORATORIOSSA

2.1 Servomoottori

Työssä käytettiin Control Techniquesin valmistamaa AC-servomoottoria, jota käytettiin simuloimaan tuulivoimalan roottoria. Servomoottori on esitettyä kuvassa 6. Se on kuvassa taaempana oleva musta moottori. Servomoottoria ohjaa Control Techniquesin valmistama Unidrive UNI2402 taajuusmuuttaja.



KUVA 6. Servomoottori ja oikosulkumoottori

Servomootorille tuotiin käyntiohje ulkoisesti National Instrumentsin myDAQ-signaalin käsittelytyökalun avulla 0-10V jännitesignaalinä. Servomoottori saadaan pyörimään halutulla nopeudella välillä 0-3000 rpm. LabVIEW:lla tehdyllä ohjauksella saatiin rotorin suurimmaksi pyörimisnopeudeksi noin 1075 rpm, joten ohjausta oli skaalattava siten, että saatiin servomoottori pyörimään tällä nopeudella kun ohjausjännite oli 10V. Tällöin servomoottori pyöri automaattisesti oikealla nopeudella kun ohjausjännite vaihteli nolasta kymmeneen volttiin.

Servomoottorin ohjauspaneelia on jo aiemmin muutettu siten, että servomootorille saadaan tuotua ulkoinen ohjaussignaali ilman että tarvitsee tehdä uusia muutoksia. Muutoksella on ohitettu paikallisohjauksen nopeuspotentiometri. Ulkoisen ohjauksen käyttämiseen riittää että ohjauspaneeliin lisätystä valintakytkimestä valitsee ulkoisen nopeusohjeen ja tuo ohjaussignaalin liitäntöihin. Tällöin servomoottoria voidaan ohjata suoraan tietokoneella käytettävällä LabVIEW-ohjauksella, eikä servomoottorin ohjauspaneelista tarvitse säätää mitään. Servomoottorin ohjauspaneeli on esitettyä kuvassa 7.



KUVA 7. Servomoottorin ohjauspaneeli

Servomootorin ohjauspaneelista voidaan ottaa suoraan nopeus- sekä momentitiedon mittaussignaaleit. Molemmat ovat $\pm 10V$ jännitetietoja. Nopeus- ja momentitiedon mitausliittimet ovat kuvassa 7 yläreunassa.

2.2 Oikosulkumoottori

Työssä käytettiin kuormalaitteena SEW-Eurodriven valmistamaa 2,2 kilowatin oikosulkumoottoria. Moottori on kuvassa 6 etualalla oleva punainen moottori. Oikosulkumoottoria ohjattiin ABB:n valmistamalla ACS-600 taajuusmuuttajalla joka on esitetty kuvassa 8. Taajuusmuuttajaan piti parametroida käytetyn oikosulkumoottorin kilpiarvot jotka on esitetty taulukossa 1



KUVA 8. ABB ACS 600 taajuusmuuttaja

TAULUKKO 1. Oikosulkumoottorin nimellisarvot

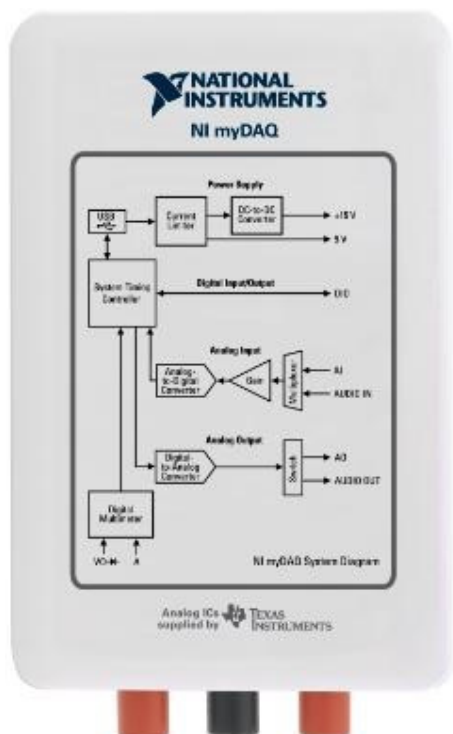
U / V	I / A	n / rpm	T / Nm
400	4,9	1410	14,9

2.3 NI myDAQ

National Instrumentsin myDAQ on signaalienkäsittelytyökalu joka on edullisuutensa vuoksi suunnattu erityisesti opiskelijoille. NI myDAQ:lla voidaan mitata ja tuottaa erilaisia sähköisiä signaaleja. Se käyttää graafista LabVIEW -ohjelmointikieltä, jolla laitteessa olevia valmiiksi asennettuja ohjelmia voi muokata, tai tehdä täysin uusia ohjelmia, mikäli valmiiksi asennetut eivät ole riittäviä. MyDAQ:ssa on valmiiksi asennettuna kahdeksan ohjelmaa, esimerkiksi yleismittari, oskilloskooppi sekä funktiogeneraattori. (National Instruments, 2015)

NI myDAQ on käytännöllinen, koska se on pienikokoinen ja ottaa tarvitsemansa virran tietokoneen USB-portista, joten erillistä virtalähdettä/virtajohtoa ei tarvita. Yksi myDAQ:n valmiista ominaisuuksista on tasajännitteen $\pm 10V$ ulostulo. Ulostulon analogiset lähdöt löytyvät riviliittimen paikoista AO 0 ja AO 1.

Kuvissa 9 ja 10 on esitettyä myDAQ laite. Kuvassa 9 se on esitettyä edestä ja kuvassa 10 on esitetty myDAQ:n riviliitin joka löytyy laitteen oikeasta kyljestä. Laitteen yläreunassa on USB-liitäntä ja alareunassa on yleismittarin mittausliitännät. Laitteen oikeassa kyljessä on riviliittimen lisäksi audioliitännät sisään ja ulos. Niiden avulla myDAQ:lla voidaan analysoida tai tuottaa ääntä.



KUVA 9. NI myDAQ (National Instruments)



KUVA 10. NI myDAQ:n riviliitin (National Instruments)

NI myDAQ:n liitännöistä käytettiin analogisia AO 0 ja AI 0 liitäntöjä, eli analoginen output eli analoginen lähtö 0 ja analoginen input eli analoginen tulo 0. Lähtösignaalilla annettiin servomootorille nopeusohje ja tulosignaalilla tuotiin momentin mittaussignaali LabVIEWiin.

2.4 LabVIEW

LabVIEW on graafinen ohjelmointikieli, jolla voidaan tehdä ohjauksia NI myDAQ:lle. Tässä työssä LabVIEW:lla tehtiin simulaatio joka ohjaa servomoottoria. Kuvassa 11 on esitettyä LabVIEW:lla tehdyn ohjausohjelman näyttötaulu. Näyttötaulussa voidaan

muuttaa simuloitavan tuulivoimalan arvoja kuten roottorin lapojen pituutta sekä käynnistys- ja pysäytystuulennopeutta. Liukusäätimellä voidaan muuttaa tuulennopeutta portaattomasti, jolloin servomootorin pyörimisnopeus muuttuu. Lisäksi näyttötaulussa näkyy simuloinnissa laskettavia arvoja kuten generaattorin teho ja generaattorin pyörimisnopeus.



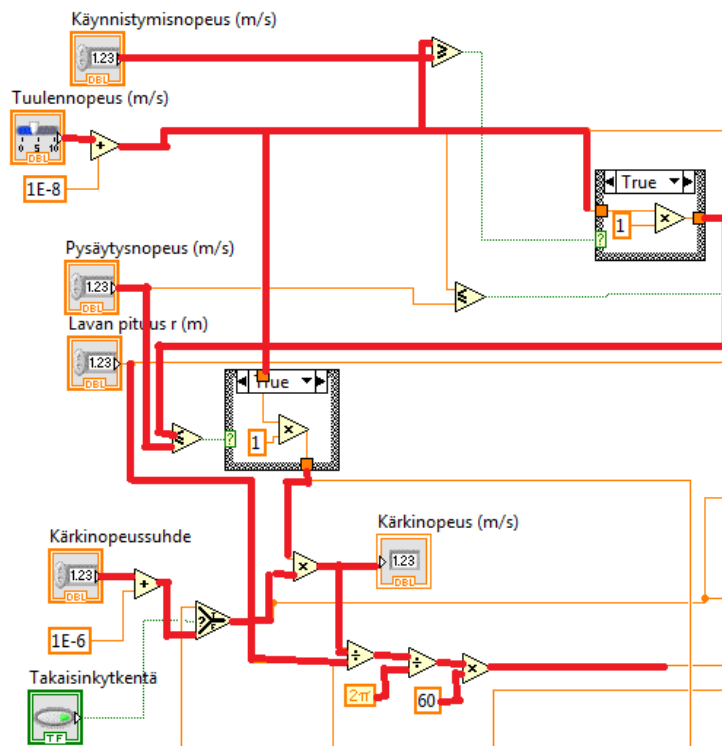
KUVA 11. LabVIEW ohjauksen näyttötaulu

Kuvassa 11 näkyvällä takaisinkytkentä -kytkimellä saadaan ohjelma säätämään pyörimisnopeutta kuormituksen mukaan, jolloin vasemmalla olevaa Kärkinopeussuhde -valintaa muuttamalla ei enää tapahdu mitään, vaan ohjelma laskee kuormituksen avulla kärkinopeussuhteen. Tämän jälkeen laskettu kärkinopeussuhde, joka näkyy kuvassa oikealla, syötetään takaisinkytkentänä vasemmalla olevan kärkinopeussuhteen tilalle.

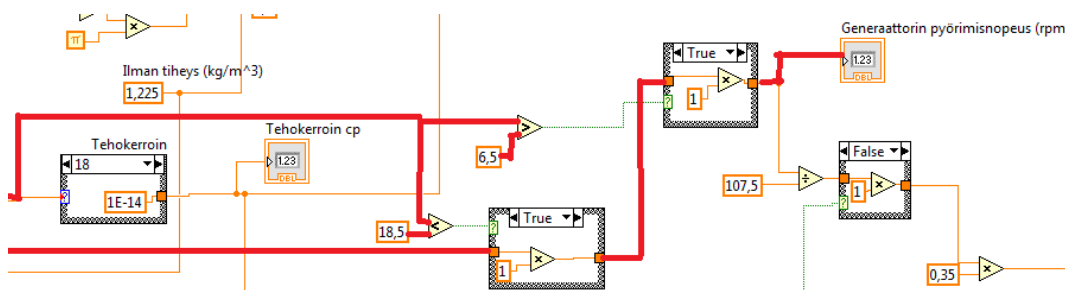
Kuvassa 11 ovat myös output ja input -signaalien kuvaajat. Output-signaali on 0-10V jänniteviesti servomoottorin nopeusohjaukseen. Input-signaali on myös 0-10V jännite-signaali, ja se tulee servon momentinmittauksesta. Input-signaalin avulla lasketaan momentin todellinen arvo sekä kerrotaan se vastaamaan simuloinnin arvoa. Tämän jälkeen siitä lasketaan momenttikerroin c_t ja momenttikertoimesta ja tehokertoimesta c_p lasketaan kärkinopeussuhde, joka syötetään takaisinkytkentänä ohjelman alkuun.

Kuvassa 12 on esitettyä pyörimisnopeuden laskeminen LabVIEW:ssa. Siinä pyörimisnopeuteen liittyvät on vahvistettu punaisilla viivoilla. Ylhäältä lähtiessä ensimmäisenä on käynnistysnopeuden ehto. Jos tuulenoisuus on alle määritetyn käynnistysnopeuden, ehto ohjaa pyörimisnopeuden nolaksi. Seuraavana on pysäytysnopeuden ehto. Jos tuulenoisuus on yli määritetyn pysäytysnopeuden, ehto ohjaa pyörimisnopeuden nolaksi. Tämän jälkeen lasketaan roottorin lapojen kärkinopeus tuulenoisuuden ja kärkinopeussuhteen avulla kertomalla ne keskenään. Kun kärkinopeus on laskettu, lasketaan pyörimisnopeus kaavan 5 avulla. Pyörimisnopeuteen on vielä lisätty kaksi ehtoa, jotka ohjaavat pyörimisnopeuden nolaksi, kun kärkinopeussuhde on yli 18,5 tai alle 6,5. Nämä ehdot on esitetty kuvassa 13. Myös siinä on vahvistettu punaisilla viivoilla oleelliset kohdat.

$$n = \frac{v_{\text{kärki}} \cdot 60}{r \cdot 2 \cdot \pi} \quad (5)$$

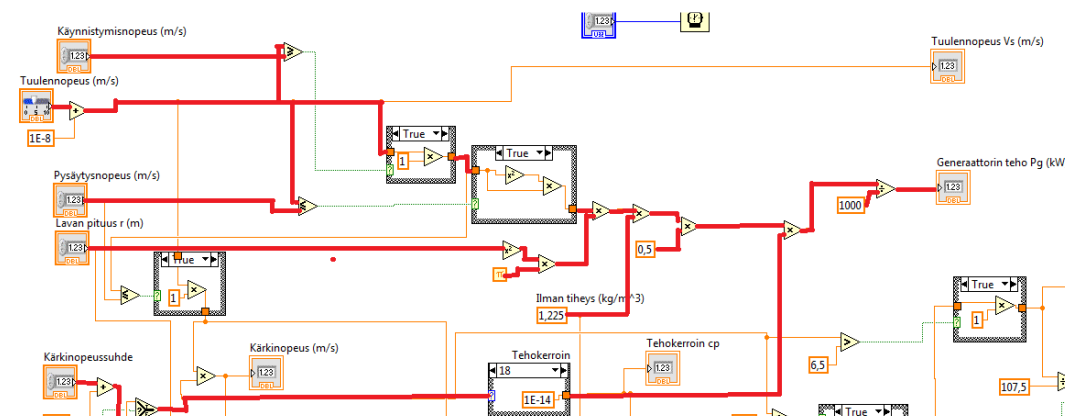


KUVA 12. Kierrosnopeuden laskeminen



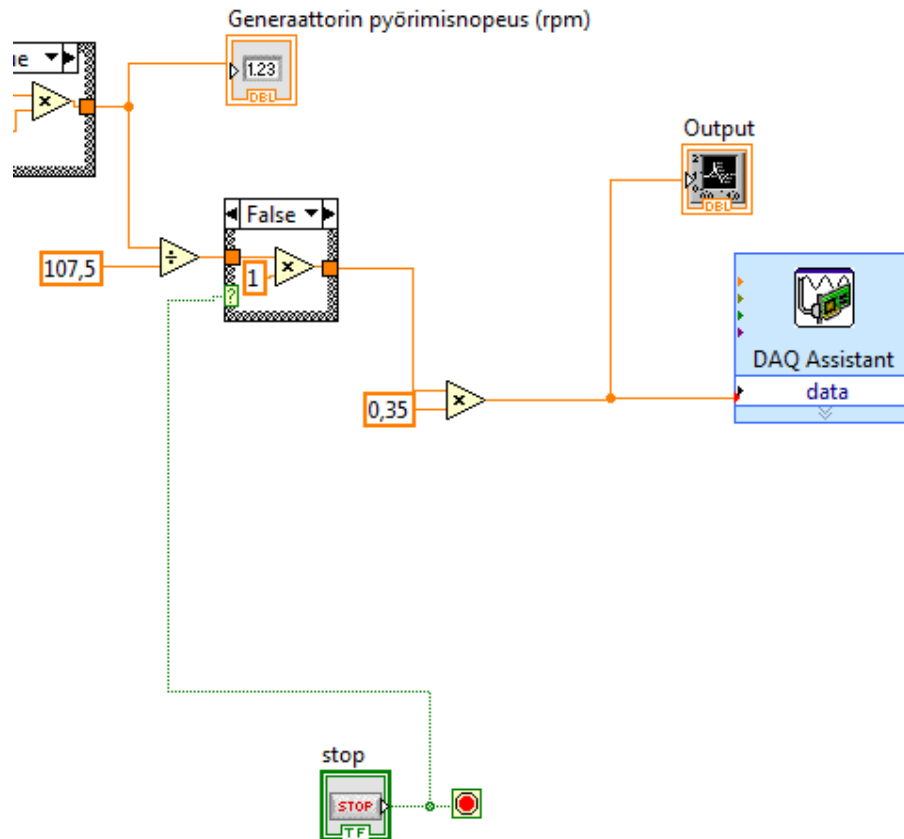
KUVA 13. Pyörimisnopeuden kärkinopeusrajat

Kuvassa 14 on esitettyä tuulivoimalan tehon laskeminen. Kuvassa on punaisilla viivoilla vahvistettu tehon laskemiseen liittyvät osiot. Tehon laskemiseen on käytetty kaavaa 1. Ensimmäisenä tulevat ehdot käynnistymis- ja pysäytysnopeuksille. Pysäytysehto sisältää myös tuulennopeuden nostamisen kolmanteen potenssiin. Tämän jälkeen tuulennopeus on kerrottu roottorin pyyhkäisyypinta-alalla, ilman tiheydellä, puolella sekä tehokertoimella. Tämän jälkeen teho on vielä jaettu tuhannella, jolloin tehon yksiköksi saadaan kilowatti. Tehokertoimen määrittämiseen riippuu kärkinopeussuhde. Pienimmillään tehokerroin on kun kärkinopeussuhde on 18 ja suurimmillaan kun se on 7. Tällöin myös teho on suurimmillaan kärkinopeussuhteen ollessa 7.



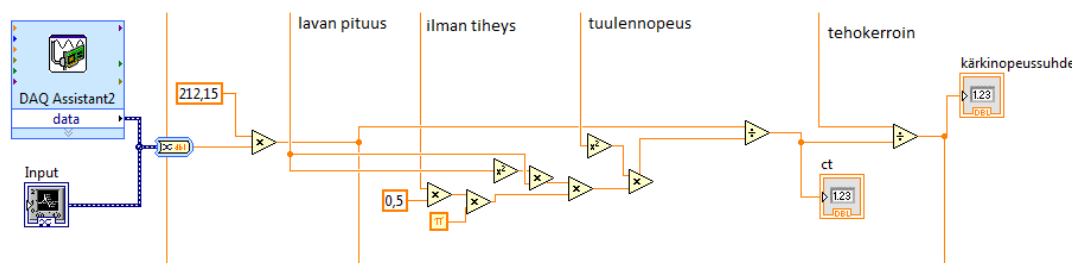
KUVA 14. Tehon laskeminen

Kuvassa 15 on esitettyä pyörimisnopeuden vieminen NI myDAQ:n lähtöön. Siihen on asetettu kaksi skaalausta, joiden ansiosta servomoottori saadaan pyörimään oikealla nopeudella sekä saadaan signaalin arvo pysymään alle kymmenen, jotta myDAQ pystyy käsittelemään sitä. Lähdön signaalista otetaan vielä kuvaaja. Lisäksi signaalille on laitettu pysäytysehto. Kun ohjelmasta painetaan stoppia, ohjaa ehto signaalin nollassa. Ilman tätä jäisi signaalin arvoksi se, mikä olisi stoppia painettaessa.



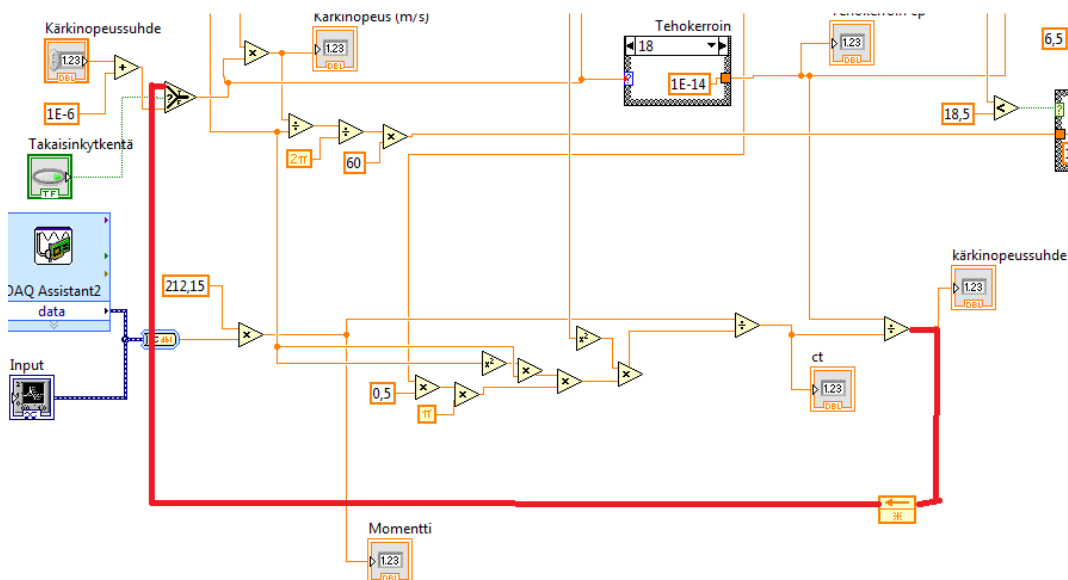
KUVA 15. Signaalin vieminen myDAQ:lle

Kuvassa 16 on esitettyä momenttimittaussignaalin tulo, signaalin skaalaus sekä momenttikerroimen että kärkinopeussuhteen laskeminen. Signaali tulee myDAQ:lta ja siitä otetaan kuvaaja. Tämän jälkeen se muutetaan toiseen muotoon. Sen jälkeen signaali skaalataan vastaamaan simuloinnin arvoja. Tämän jälkeen skaalatusta momentista lasketaan momenttikerroin c_t . Momenttikerroin lasketaan kaavan 4 avulla ratkaisemalla momentin laskukaavasta momenttikerroin. Kun momenttikerroin on laskettu, lasketaan kärkinopeussuhde jakamalla tehokerroin momenttikertoimella.



KUVA 16. Sisääntulosignaalin skaalaus, momenttikertoimen sekä kärkinopeussuhteen laskeminen

Kuvassa 17 on esitettyä kärkinopeussuhteen vieminen ohjelman alkuun takaisinkytkennällä. Kun kärkinopeussuhde on laskettu tehokertoimen ja momenttikertoimen avulla, viedään se feedback noden avulla ohjelman alkuun. Laskettu kärkinopeussuhde ja käynnistettäessä valittava kärkinopeussuhde on kytketty valitsimeen. Kun Takaisinkytkentä-painiketta painetaan, alkaa ohjelma käyttämään takaisinkytkettyä kärkinopeussuhdetta.

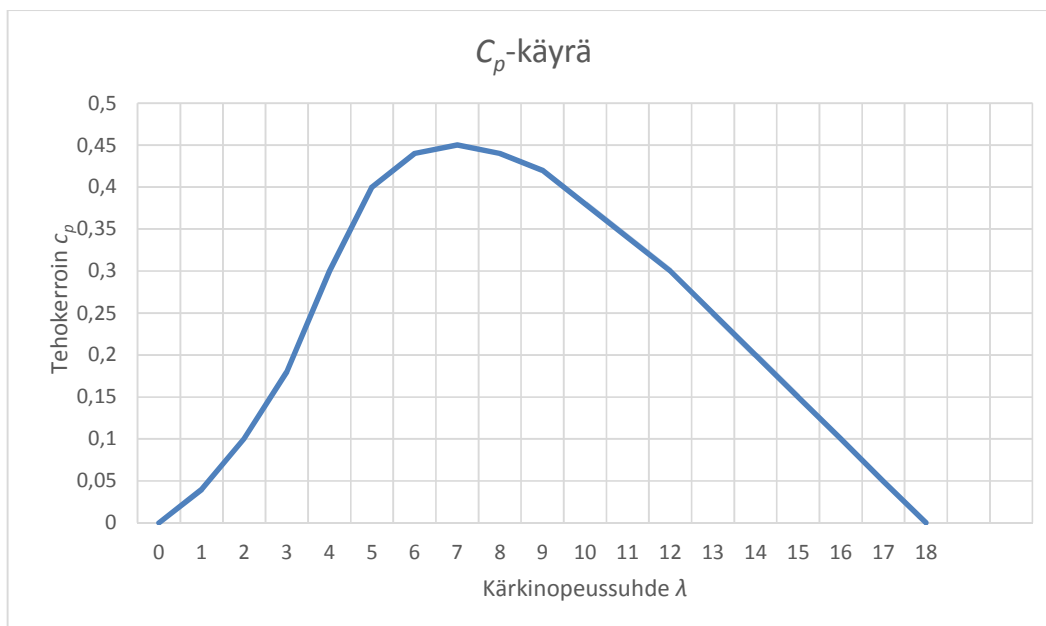


KUVA 17. Kärkinopeussuhteen takaisinkytkentä

Liitteessä 1 on esitettyä LabVIEW:lla tehty ohjelma kokonaisuutena.

2.5 Simuloinnin tulokset

Simuloinnissa käytettävä tuulivoimalan c_p -käyrä on esitettyä kuviossa 3. Kuviossa tehokerroin on esitettyä kärkinopeussuhteen λ funktiona. Kun kärkinopeussuhde λ on 18, pyörii voimala tyhjäkäynnillä. Kun kärkinopeussuhde on 7, on tuulivoimalan tehokerroin suurimmillaan. Kun simuloinnissa kärkinopeussuhde muuttuu, muuttuu myös tehokerroin.



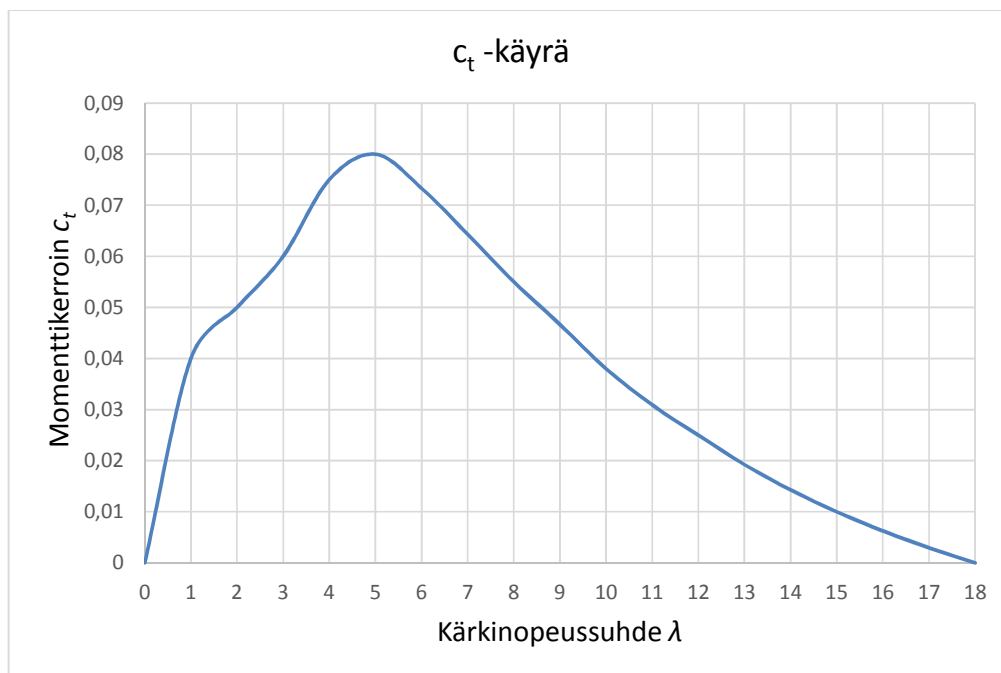
KUVIO 3. Simuloinnissa käytetty tehokerroinkäyrä

Kuviossa 4 on esitettyä simuloinnissa käytetystä tehokerroinkäyrästä laskettu momenttikerroinkäyrä. Se on laskettu kaavan 3 avulla, eli jakamalla tehokerroin c_p kärkinopeussuhteella λ . Muodoltaan se poikkeaa tehokerroinkäyrästä, ja suurin momentti osuu pienempään kärkinopeussuhteeseen kuin suurin teho. Kuvassa 11 esitetyillä tiedoilla tuulen maksiminopeudesta ja roottorin säteestä saadaan kaavalla 1 laskettua suurin teoreettinen teho simuloitavalle voimalalle kun käytetään kuvion 3 suurinta tehokerrointa.

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

$$P = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \frac{kg}{m^3} \cdot \left(20 \frac{m}{s}\right)^3 \cdot \pi \cdot (4 m)^2 \cdot 0,45$$

$$P = 110835 W \approx 110 kW$$



KUVIO 4. Simuloinnissa käytetty momenttikerroinkäyrä

Simulointiin ohjelmoitiin rajoitus, että kun kärkinopeussuhde laskee alle 7, niin voimala ohjataan pysähdyksiin. Tämän vuoksi momenttikäyrän mukaista teoreettista maksimimomenttia ei saada tuotettua. Kuvassa 11 esitetyillä tiedoilla tuulen maksiminopeudesta ja roottorin säteestä saadaan kaavalla 4 laskettua simuloinnin suurin teoreettinen momentti c_t -käyrän kärkinopeussuhdetta 7 vastaavalla momenttikertoimella.

$$T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot R^3 \cdot \pi \cdot v_{tuuli}^2 \cdot c_t \quad (4)$$

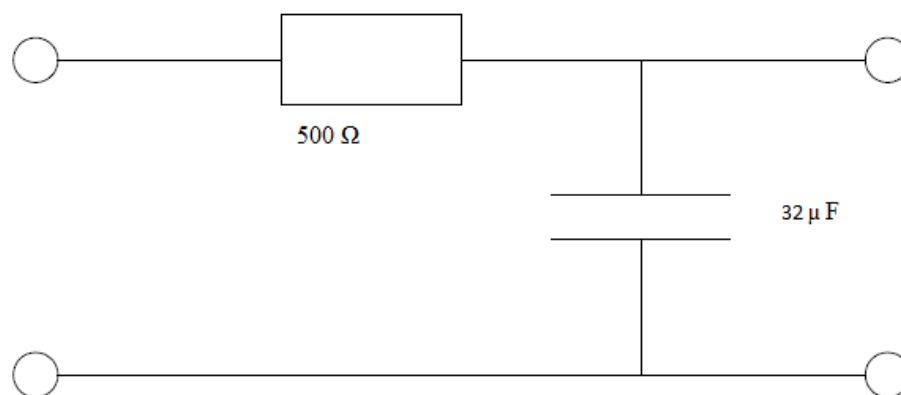
$$T = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \frac{kg}{m^3} \cdot (4 m)^3 \cdot \pi \cdot (20 \frac{m}{s})^2 \cdot 0,0643$$

$$T = 3167 Nm \approx 3200 Nm$$

Koska servomootorin nimellinen momentti oli 18 Nm ja oikosulkumootorin nimellinen momentti oli 14,9 Nm, piti mitattua momenttia skaalata suuremmaksi. Skaalaus tehtiin jakamalla suurin teoreettinen momentti 3167 Nm kuormalaitteen nimellismomentilla 14,9 Nm. Skaaluskertoimeksi saatiin 212,55.

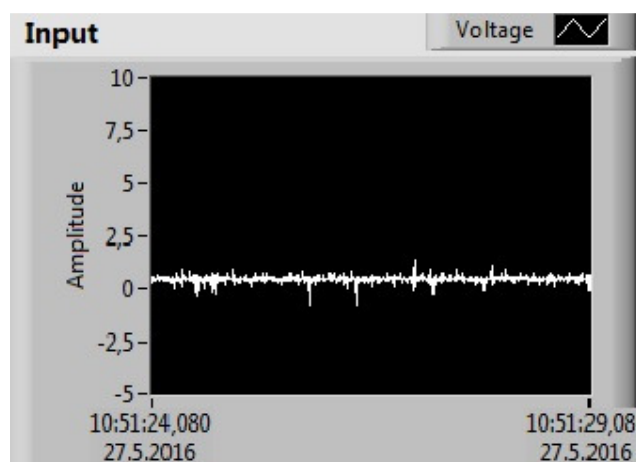
Servomootorin momentin mittaustieto oli asetettu välille ± 325 Nm, eli 325 Nm vastasi 10 V. Tämän vuoksi työssä suurimpana käytetty momentti eli kuormitusmootorin nimellismomentti 14,9 Nm toi hyvin pienen jännitetiedon, alle puoli voltia. Mittaussignaalin häiriöiden vuoksi jännitetietoa ei pystynyt skaalaamaan suuremmaksi LabVIEWissä,

koska tällöin myös häiriöt suurenivat. Häiriöitä saatiin hieman poistettua lisäämällä mittauksen jälkeen alipäästösuodatin joka on esitetty kuvassa 18.

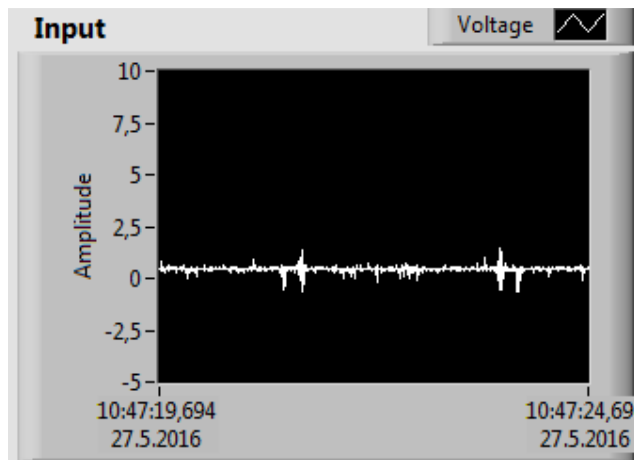


KUVA 18. Alipäästösuodatin

Kuvissa 19 ja 20 on esitettyinä momentin mittaussignaali maksimikuormituksella, eli 14,9 Nm. Kuvista nähdään, että jännite on hyvin matala ja se sisältää häiriötä paljon suhteessa jännitetasoon. Kuvassa 13 on mittaussignaali ilman alipäästösuodatinta ja kuvassa 14 on mittaussignaali alipäästösuodattimen kanssa. Kuvista nähdään, että suodatuksen lisääminen ei poistanut kovinkaan paljoa häiriöitä mittaussignaalista.



KUVA 19. Mittaussignaali ilman suodatusta



KUVA 20. Mittaussignaali suodatuksella

Momentin mittaussignaalin pienuus yhdessä häiriöiden kanssa aiheuttivat sen, ettei simuloinnin käytännön osuus onnistunut. Servomootorin taajuusmuuttajan parametrien muuttaminen momenttitiedon suhteen ei onnistunut lukuisista yrityksistä huolimatta, joten signaalia ei saanut suuremmaksi.

3 POHDINTA

Työ oli haasteellinen, enkä täysin päässyt haluttuun lopputulokseen, sillä momentinmittauksen takaisinkytkentää ei saatu toimimaan halutusti. Simuloinnin toteuttaminen LabVIEW ohjelmistolla oli mielenkiintoista, vaikkakin todella aikaa vievää. Jos kyseistä ohjelmistoa olisi käyttänyt joskus aiemminkin, olisi varmasti päässyt nopeammin haluttuun lopputulokseen. Kenties olisi onnistunut jopa löytämään ratkaisun takaisinkytkennän ongelmiin.

LabVIEW:n käytössä alkuun pääsemisessä kesti kauan, koska en ollut aiemmin sitä käyttänyt. Tampereen ammattikorkeakoulun vapaasti valittavasta LabVIEW kurssista olisi varmasti ollut suuri apu, mutta en sitä ollut käynyt. Nyt ohjelmiston käytön opettelu tapahtui monien Youtube -opasvideoiden avulla. Niistä oli suuri apu yksinkertaisien ohjelmointiin liittyvien keinojen opettelussa. Laajempien ja soveltavampien rakenteiden tekemiseen niistä ei kuitenkaan kauheasti ollut apua, vaan niihin piti itse löytää ratkaisut.

Työ oli mielenkiintoinen ja siinä pääsi hyvin sisään graafiseen ohjelmointiin. Ohjelmoinnin jonkunlaisesta hallinnasta voi olla tulevaisuudessakin paljon hyötyä. Lisäksi työssä tuli perehdyttyä tuulivoimaan ja sen teoriaan, mikä oli todella kiinnostavaa.

LÄHTEET

ABB ACS800 käyttöohje. Luettu 6.4.2016

https://library.e.abb.com/public/bc76f338d0f2f7f2c1257c16004c6825/FI_ACS800-01_HW_K_A4_screen.pdf

EWEA. Wind in power 2012 European statistics. Luettu 16.12.2014.

http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/Wind_in_power_annual_statistics_2012.pdf

Huhtinen, M. & Korhonen, R. & Pimiä, T. & Urpalainen, S. 2008. Voimalaitostekniikka. Keuruu: Opetushallitus

Jokamiehen opas pientuulivoimalan käyttöön. Luettu 23.3.2016

http://www.tuulivoimayhdistys.fi/filebank/759-Joka_miehen_opas_motiva.pdf

Lindell, I. 2009. Sähkön pitkä historia. Helsinki: Otatieto Oy

Motiva. Luettu 22.3.2016

http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/uusiutuva_energia_suomessa/uusiutuvan_energian_tuet/syottotariffi

National Instruments. MyDAQ. Luettu 21.4.2016

<http://www.ni.com/mydaq/what-is/>

Suomen tuuliatlas. Luettu 24.3.2016

<http://www.tuuliatlas.fi>

Suomen tuulivoimatilastot. Luettu 22.3.2016

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

Suomen Tuulivoimayhdistys. Luettu 24.3.2016

<http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta>

LIITTEET

Liite 1. LabVIEW:lla tehty ohjelma

