



Tuulivoimalan tehontuotto

Toteutuminen käytännössä

Janne Apilisto

OPINNÄYTETYÖ
Kesäkuu 2022

Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma
Sähkövoimatekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma
Sähkövoimatekniikka

APILISTO, JANNE:
Tuulivoimalan tehontuotto
Toteutuminen käytännössä

Opinnäytetyö 29 sivua
Kesäkuu 2021

Työn tarkoituksena oli tutkia käytännössä toteutunutta tuulivoiman tuotantoa eräässä kotimaisessa tuulipuistossa. Tutkimusta varten saatiin hanketoteuttajalta kahdelta vuorokaudelta mittausdataa, joka sisälsi hetkittäisen keskituulennopeuden ja voimalan tuottaman tehon jaettuna kymmenen sekunnin ajanjaksoihin, joista kustakin oli mitattu näiden suureiden keskiarvot kyseisellä aikavälillä.

Mittausdata järjestettiin voimaloittain suuruusjärjestykseen suhteutettuna tuulennopeuteen. Tämä mahdollisti tarkastelun siitä, kuinka hyvin tuulivoimaloiden teoreettiset tehokäyrät toteutuvat käytännössä. Mittausdatasta piirrettiin kuvaaja, josta voitiin todeta voimalan oletettu nimellisteho sekä nähdä nopeudet, joissa syystä tai toisesta sähköntuotanto ei vastaa voimalan maksimia, joka olisi saatavissa kyseisellä tuulennopeudella.

Lopuksi laskettiin, paljonko tehoa jäi tuottamatta, kun toimittiin nimellisen tuulennopeuden yläpuolella, ja samaan aikaan voimala ei tuottanut nimellistehoa, joka siitä olisi ollut saatavissa. Lopuksi etsittiin syitä, miksi näin on, mutta datan puutteellisuudesta johtuen havainnot rajoittuvat yleiselle tasolle, jota voidaan tietää tuulivoimaloiden käyttäytymisestä.

ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical Engineering

APILISTO JANNE:
Wind Power Generation in Practice

Bachelor's thesis 29 pages
June 2021

The purpose of the work was to study the actual production of wind power in a Finnish wind farm. For the study, measurement data were collected from the project implementer for two days. It included the instantaneous average wind speed and the power generated by the power plant divided into ten-second time periods. Each of these measurements had calculated the averages of these variables during that period.

The measurement data were arranged by power order in relation to wind speed. This made it possible to examine how well the theoretical power curves of wind turbines are realized in real time. From the measurement data, a graph was drawn from which the assumed rated power of the power plant could be determined, as well as the speeds at which, for one reason or another, the electricity production did not correspond to the maximum power that would be available at that wind speed.

Finally, the difference between the actual power produced and the expected power when the turbines operate above the nominal wind speed was calculated. The cause of such discrepancy needs further research before generalizing the result.

Key words: wind power, power plant

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
2	TEORIA	6
2.1	Tuuli	7
2.2	Tuulen teho	7
2.3	Tuulivoimalan tehonsäätö	9
2.3.1	Passiivinen sakkaussäätö	9
2.3.2	Lapakulmien säätö	9
2.3.3	Aktiivinen sakkaussäätö	10
2.4	Tehokäyrä	11
3	TOTEUTUNUT TEHONTUOTANTO	12
4	HYÖDYNTÄMÄTTÄ JÄÄNYT TEHONTUOTTO	24
5	TULOSTEN ANALYYSI	25
5.1	Tehontuottokäyrät	25
5.2	Saavuttamatta jäänyt teho	26
6	POHDINTA	27
	LÄHTEET	29

1 JOHDANTO

Alun perin opinnäytetyöni piti käsitellä Tampereen Ammattikorkeakoulun sähkövoimatekniikan laboratoriossa ollutta harjoitustyötä, ja sen markkinointimateriaalin valmistamista, jonka avulla laboratorion toimintaa olisi voinut esitellä ulkopuolisille. Materiaali olisi toiminut videomuodossa käyntikorttina ja esimerkkinä mahdollisuuksista, joita liittyy laboratoriotöiden tekemiseen.

Kevättalvesta 2020 alkanut pandemia kuitenkin sotki suunnitelmat, koska työn tekeminen olisi edellyttänyt läsnäoloa laboratoriossa ja samaan aikaan yhteiskuntaa ja esimerkiksi kouluja suljettiin ja siirryttiin etäopetukseen. Tarkoitukseni oli jatkaa jo alkuun päässyttä suunnittelua työn aiheesta, mutta keväällä 2022 opinnäytetyöni ohjaaja ehdotti toista aihetta.

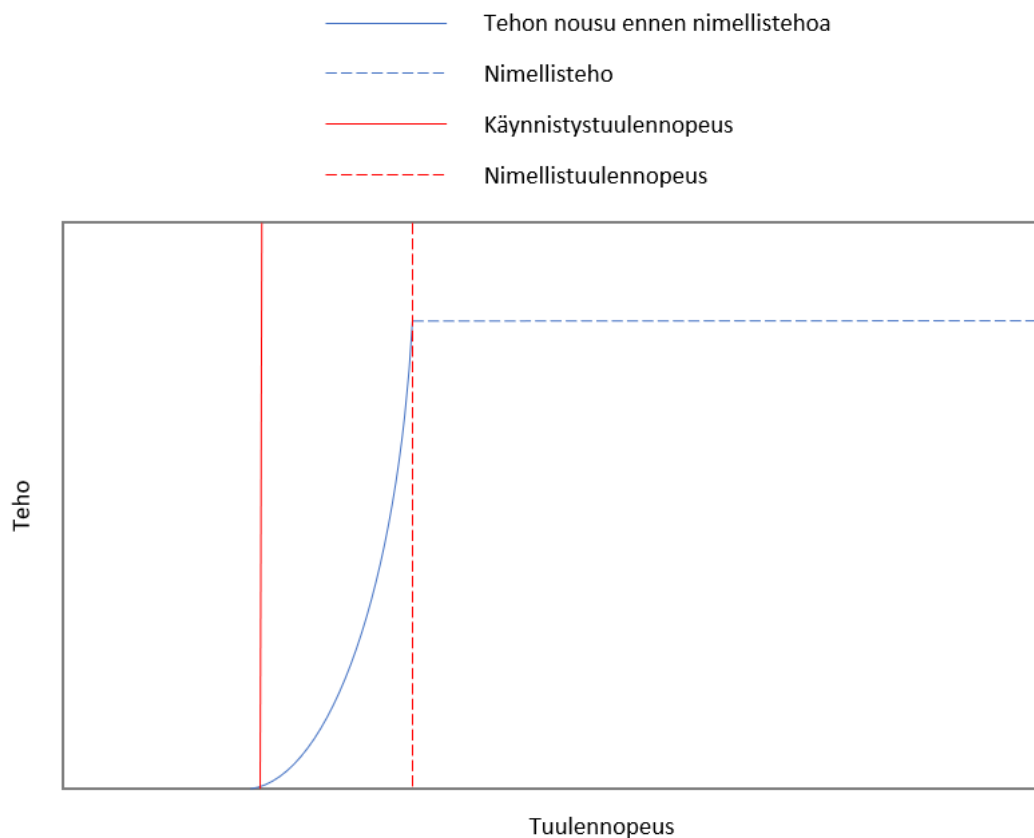
Tampereen ammattikorkeakoulu sai älyverkkosimulaattori-hankkeessa käyttöönsä todellisen tuulipuiston mittausdataa, jota käytettiin hankkeessa sääriippuvien tuotantomuotojen sähköverkkovaikutusten analysointiin. Hanketyön yhteydessä kävi kuitenkin ilmi, että käytännössä toteutuneet tuulipuiston teholumemat poikkesivat yllättävän paljon teoreettisten tehokäyrien lukemista. Tätä haluttiin tutkia lisää, mikä toimi alkusysäyksenä tämän opinnäytetyön teettämiseksi.

Seuraavassa luvussa käydään läpi teoriaa ilmiöiden takana, jotka saavat aikaan lopulta tehontuotannon tuulivoimalassa. Tutkitaan myös mitä erilaisia tapoja on rajoittaa tehontuotantoa tilanteissa, joissa luonnonvoimat uhkaavat käydä hallitsemattomiksi. Luvussa 3 tutkitaan toteutuneita tehontuottokäyriä, ja pyritään löytämään syitä niiden muodoille. Luvussa 4 lasketaan, paljonko nimellistuulennopeudella menetettiin tehontuottoa erilaisista häiriöistä johtuen ja mitä se tarkoittaa vuositasona. Lopuksi pyritään löytämään syitä toteutuneille tuloksille.

2 TEORIA

Tuulivoima on lisääntynyt viime vuosina voimakkaasti. Se on uusiutuva energiamuoto, jossa energiaa otetaan talteen ilmamolekyylien liikkeestä. Joten niin kauan kuin esiintyy tuulta, saadaan myös sähköenergiaa. Se on samalla sen heikkous, koska jos ei tuule, on myös sähköntuotanto nollassa. (TUULIVOIMAYHDISTYS)

Voimalasta riippuen, se alkaa tuottamaan sähköä vasta, kun tuulennopeus ylittää voimalan käynnistysnopeuden, yleensä noin 3 m/s, jolloin tuulennopeus on riittävä pyörittämään roottoria. Kun roottori ei pyöri, tuotanto on katettava muilla energiamuodoilla. Voimaloilla on myös yksilölliset kynnysnopeudet tuulelle, joilla niistä saadaan täysi suunniteltu teho tuotantoon. Tätä tuulen nopeutta, joilla tuo teho saavutetaan, kutsutaan nimellistuulennopeudeksi, ja saavutettua tehoa nimellistehoksi. Tuulennopeuden ja tehon suhde on kuvattu kuviossa 1.



KUVIO 1, Ideaalisen voimalan tehontuotto.

2.1 Tuuli

Tuuli, joka pyörittää voimalan roottoria, on ilmamolekyylien liikettä. Liike on aina suhteellinen maapallon pyörimiseen. Pääasiassa ilma koostuu tyydestä ja hapesta, mutta myös pienemmistä määristä argonia, hiilidioksidia sekä muita kaasuja. Painovoima vetää puoleensa myös ilmamolekyyliä. Koska ilma puristuu voimakkaasti kasaan, pienenee ilmanpaine ylöspäin mentäessä lopulta kohti nollaa. Alimpana oleva ilma on siis tiheimmillään. Tuulen mallintamisessa ollaan enemmän kiinnostuneita ilmanpaineen muutoksista suhteessa vaakasuuntaan. Voimakkaimmin vaakasuuntaiseen ilmanpaineen muutokseen vaikuttaa lämpötila (KORPELA, s5). Kun ilma lämpenee, sen hiukkasten lämpövärähtely kiihtyy, mistä johtuen ilmamassa laajenee, koska värähtelyyn tarvitaan enemmän tilaa. Näin ollen vähemmän ilmamolekyyliä mahtuu samaan tilavuuteen, jolloin ilmanpaine pienenee. Myös kosteudella on oma pienempi osuutensa ilmanpaineeseen. Kosteaa ilmaa on harvempaa kuin kuivaa ilmaa (KORPELA s6).

Meteorologiassa sääkarttoilla ilmanpaineen vaihtelut kuvataan korkeuskäyrillä tutuilla tasa-arvokäyrillä. Käyristä muodostuu keskukset niin korkealle kuin matalalle ilmanpaineelle. Ilmanpaine pyrkii tasoittumaan näiden keskusten välillä, mikä näkyy ilmamolekyylien liikkeenä korkean paineen alueelta kohti matalamman paineen aluetta. Tiheyserot pyrkivät siis tasaantumaan. Tämä ilmapinnan liike koetaan tuulena. Liikkeen nopeus on verrannollinen paine-eron suuruuteen pituusyksikköön nähden. Kokonaisuutena ilmakehä on monimutkainen ja osin kaaottinen kokonaisuus, ja ilmapirtauksiin vaikuttavat monenlaiset muutkin voimat.

2.2 Tuulen teho

Kuten esimerkiksi vesivoimassa, myös tuulivoimassa aineen massavirrasta otetaan talteen energiaa ja muutetaan sähköksi. Tuulivoimalan roottorin pyöriminen saadaan aikaan muuttamalla tuulen liike-energiaa roottorin liike-energiaksi. Pyörivä liike muutetaan sähkömagneettisen induktion avulla generaattorissa sähköenergiaksi, joka ohjataan edelleen sähköverkkoon.

Tehon tunnus on P , ja yksikkö watti (W). Se on tehdyn työn määrä aikayksikössä. SI-järjestelmässä aikayksikön perusosa on sekunti. Ilmavirtauksen liike-energiaa, W_0 , voidaan mallintaa mekaniikan yhtälöllä

$$W_0 = \frac{1}{2} m v_0^2 \quad (1)$$

jossa m on massa ja v_0 on nopeus.

Ajan suhteen derivoitaessa, ilmavirtauksen tehoksi P_0 saadaan

$$P_0 = \frac{dW_0}{dt} = \frac{1}{2} \dot{m} v_0^2 \quad (2)$$

Yhtälössä $\dot{m}$ on massavirta yksikössä kg/s.

Huomataan vielä, että massavirta voidaan myös ilmaista muodossa

$$\dot{m} = \rho A v_0 \quad (3)$$

jossa A on kohtisuora pinta-ala ilmavirtausta vastaan ja ρ ilman tiheys. Näin ollen saadaan ilmavirran tehon yhtälöksi

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A v_0^3 \quad (4)$$

Huomataan, että teho riippuu tuulennopeuden kolmannelta potenssista. Tuulen nopeus siis vaikuttaa merkittävästi tuulesta saatavissa olevaan tehoon. Tämä näkyy myös kuviossa 1 tehontuottokäyrän alkuosassa, joka kasvaa jyrkästi käynnistysnopeuden jälkeen, kunnes voimala saavuttaa nimellistehonsa. Tuulen nopeuden kaksinkertaistuessa sen teho 8-kertaistuu. Tästä johtuu, että ei ole mielekäästä arvioida tuulivoimalan tehoa pelkästään keskituulennopeuden perusteella, vaan arvioinnissa käytetään keskimääräisiä esiintymistodennäköisyyksiä eri nopeuksille.

2.3 Tuulivoimalan tehonsäätö

Tuulivoimalasta ei useinkaan oteta sitä maksimitehoa, joka olisi saatavissa ideaalitulanteessa, jossa hyödynnettäisiin kaikki se energia, joka kulkee ilmamolekyylien liikkeenä voimalan lapapinta-alan läpi. Tehontuottoa rajoitetaan, koska voimaloille lasketaan optimaalinen maksimiteho, joka on taloudellisesti järkevä. Toisin sanoen tavoitteena ei ole tuottaa mahdollisimman paljon energiaa, vaan tavoitteena on minimoida tuotetun sähköenergian hinta tuulivoimalan elinkaaren aikana.

Voimalaa ei kannata rakenteellisesti mitoittaa tarpeettoman vahvaksi, vaan se optimoidaan tuottamaan mahdollisimman paljon sähköä mahdollisimman halvalla. (KORPELA s54) Tuulivoimalan tehoa säädetään, jotta voimalaa ei tarvitse rakentaa kestäväksi kaikista suurimpia ja harvemmin esiintyviä tuulennopeuksia. Tehonrajoitukseen käytetään erilaisia menetelmiä riippuen siitä, miten voimalaa halutaan optimoida.

2.3.1 Passiivinen sakkaussäätö

Passiivinen sakkaussäätö on yksinkertainen menetelmä. Tätä voidaan hyödyntää vakionopeuksisissa voimaloissa. Koska voimalan roottori pyörii vakionopeudella, voidaan siipien kohtauskulma rakentaa kiinteästi siten, että kun tuulennopeus kasvaa riittävän suureksi, nostovoima siivessä romahtaa, ja samalla mekaaniset voimat pienenevät.

Menetelmä toimii myös suojana voimakkaita tuulia vastaan. Se on passiivinen siksi, että se toimii automaattisesti tuulennopeuden kasvaessa, eikä lapakulmia edes ole välttämättä mahdollista muuttaa.

2.3.2 Lapakulmien säätö

Kehittyneempi menetelmä on säätää lapakulmia aktiivisesti. Tuulennopeuden mittauksen perusteella pyritään optimoimaan myös pienillä tuulennopeuksilla saatavissa olevaa tehoa. Nimellistuulennopeuden yläpuolella lavan nostovoimaa

säädetään kääntämällä lapoja siten, että kohtauskulma tuulen kanssa muuttuu. Kun lapaa käännetään riittävästi suhteessa tuulensuuntaan, ilmavirta ei enää kulje lavan päältä tasaisesti, jolloin nostovoima katoaa. Tätä nostovoiman katoamista kutsutaan sakkaukseksi.

Menetelmä muistuttaa isojen matkustajakoneiden siivekkeiden (flaps) käyttöä nousujen ja laskujen aikana, jotta siipi saisi enemmän nostetta hitaasti lennettäessä, mutta matkanopeudessa vastaavasti vähemmän. Sakkausta ei siis käytetä tehonsäätömenetelmänä tässä tapauksessa. Myrskytuulella lapakulmat ajetaan sellaiseen tilaan, että nostovoimaa ei enää synny riittävästi roottorin pyörittämiseen. Käytännössä lapakulmien säätö ei ole niin nopeaa, että se ehtisi reagoida kaikkiin tuulennopeuksien vaihteluihin. Tästä syystä nimellisnopeuden yläpuolella tehontuotto vaihtelee jonkin verran.

2.3.3 Aktiivinen sakkaussäätö

Aktiivinen sakkaussäätö on yhdistelmä passiivista sakkaussäätöä ja lapakulmien säätöä. Pienillä tuulennopeuksilla optimoidaan lapakulmia siten, että myös niillä saadaan maksimaalinen hyöty. Kun tuulennopeus kasvaa nimellistä suuremmaksi, aletaan lapoja sakata hallitusti. Sakkaussäädössä siis kohtauskulmaa kasvatetaan, kun taas lapakulmien säätömenetelmässä kohtauskulmaa pienennetään. Kokemus on osoittanut, että aktiivisella sakkaussäädöllä saadaan nimellisen tuulennopeuden yläpuolella tasaisempi tehontuotto, kun tuulennopeus vaihtelee suuresti.

Tämä johtuu siitä, että aktiivisessa sakkaussäädössä lavan kierre on mahdollista suunnitella siten, että vain osa lavasta on sakkaustilassa. Loppuosa lavasta toimii edelleen hyvällä hyötysuhteella aiheuttaen nostovoimaa ja mekaanista tehoa.

2.4 Tehokäyrä

Kaikkea ilman liikettä ei voi muuttaa sähköenergiaksi. Mikäli liikkeen kaikki energia otettaisiin talteen, tarkoittaisi se energian säilymislain mukaan sitä, että ilmavirran pitäisi pysähtyä tuulivoimalan takapuolella. Tällöin myöskään uutta ilmaa ei pääsisi virtaamaan roottorin ohi. Suurinta tehoa, joka on otettavissa talteen, mallinnetaan fyysikko Albert Betzin johtamalla ja hänen mukaansa nimetyllä Betzin lailla (KORPELA s30).

Kuviossa 1 tuulivoimalan ideaalissa tehokäyrän alkuosassa näkyy kaavan 4 mukainen tehon kuutiollinen riippuvuus tuulennopeudesta, ottaen huomioon Betzin lain kuvaaman teoreettisen maksimin. Voimalasta riippuen noin 8 m/s tuulennopeuden jälkeen taas saavutetaan voimalan suunnitteluvaiheessa mitoitettu nimellisteho. Kun tuulennopeus lisääntyy voimalan mitoitettun kestokyvyn rajoille, rajoitetaan teho turvallisuussyistä nollaan.

3 TOTEUTUNUT TEHONTUOTANTO

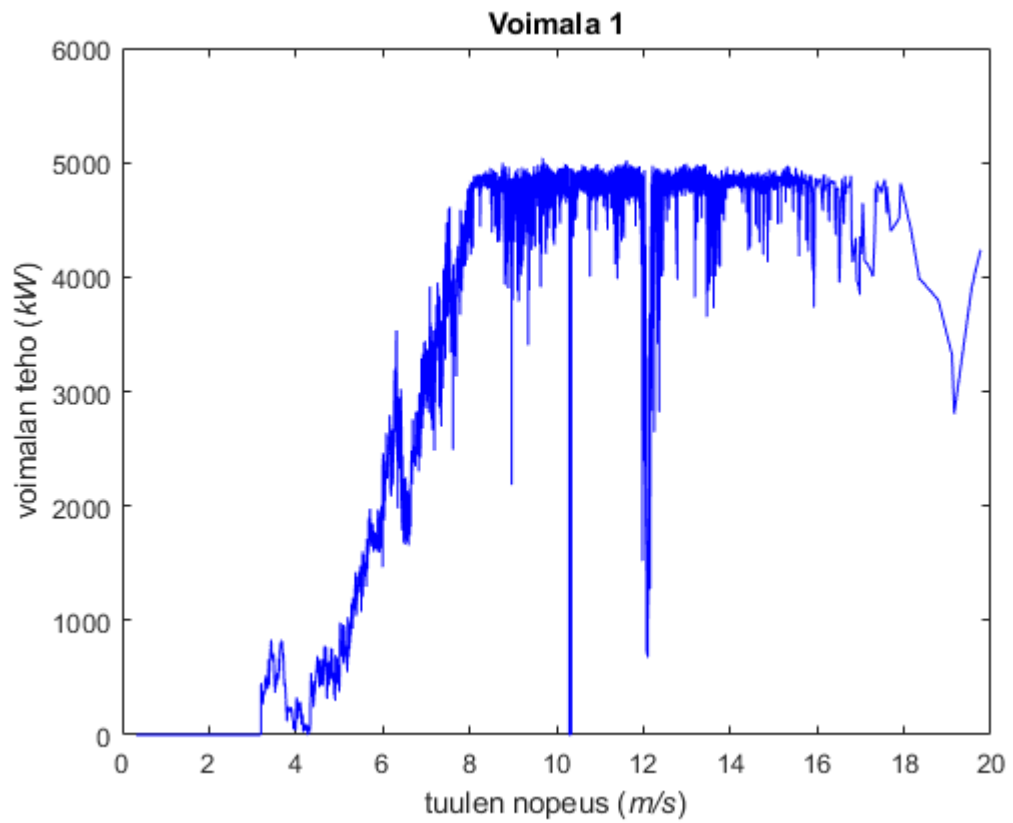
Varsinainen tarkastelun kohde tässä työssä liittyi toteutuneeseen tehontuottokäyrään. Lähdeaineistona oli kahden vuorokauden ajanjaksolta yhdeksäntoista eri voimalan toteutuneet tehomittaukset, ja niiden aikana vallinnut tuulennopeus. Ajanjakso oli jaettu kymmenen sekunnin pituisiin jaksoihin, joista jokaisesta oli mitattu keskimääräinen tuulennopeus, sekä tuotettu teho kyseisellä jaksolla.

Mittaustulokset on ensin järjestetty tuulennopeuden mukaan pienimmästä suurimpaan Excel-taulukkolaskentaohjelman avulla, jossa muodossa myös alkuperäinen aineisto on toimitettu. Toteutunut tehontuottokäyrä saatiin sijoittamalla arvot koordinaatistoon siten, että vaaka-akselilla on tuulen nopeus ja pystyakselilla tuotettu teho. Kuvaajat on piirretty käyttäen Matlab-laskentaohjelmaa. Kunkin voimalan käyrä on esitetty alempana kuvioissa 2–20. Tehontuottokäyriä tarkastelemalla huomataan, että kaikki voimalat ovat nimellisteholtaan viiden megawatin voimaloita.

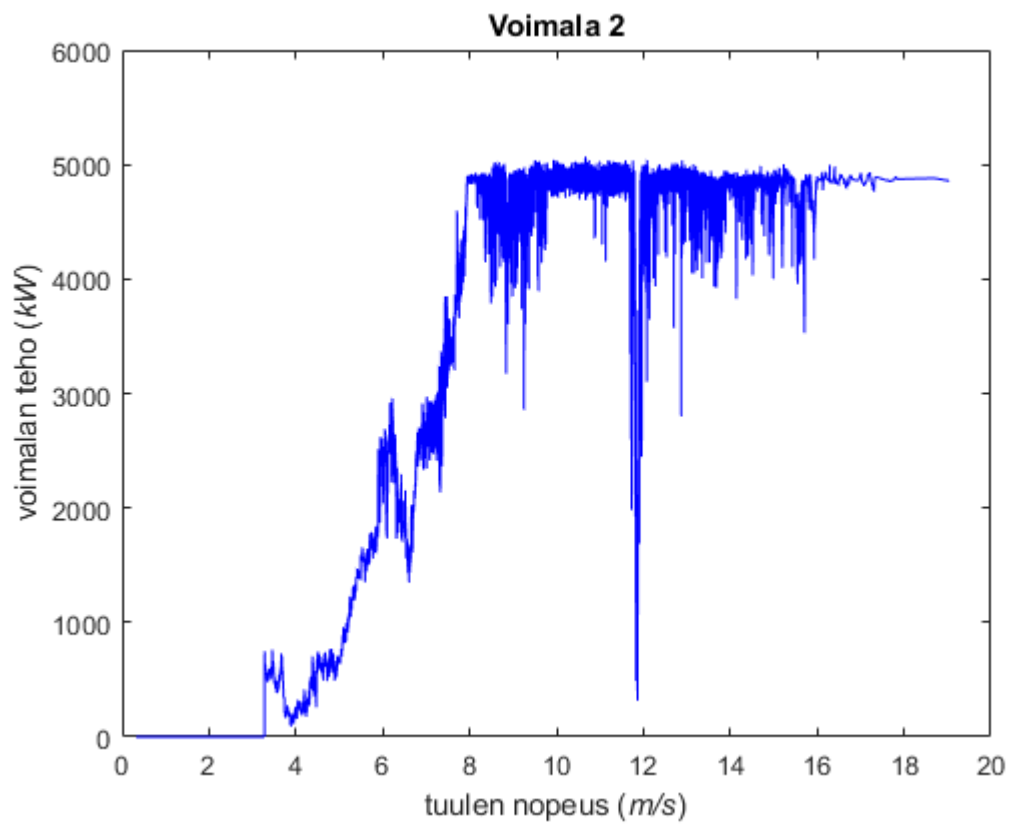
Tarkasteltaessa esimerkiksi kuvion 2 tehontuottokäyrää, voidaan huomata, että todellinen tuotanto vaihtelee kaikilla tuulennopeuksilla. Tuotanto ei vastaa täysin sileää ideaalista tehontuottokäyrää, joka on kuvattu kuviossa 1. Huomataan myös, että käytännössä toteutunut tehontuottokäyrän alkuosa vastaa likimain kaavan 4 mukaisesti nopeuden suhteen kolmanteen potenssiin nousevaa tehontuottokäyrää alkuosaltaan, kun on ylitetty tuulennopeudessa piste, jossa voimalan lavat saavat tarpeeksi energiaa tuulesta ja lähtevät pyörimään. Käyrästä huomataan myös, että tehontuoton kasvu pysähtyy viiden megawatin kohdalle, joka on tarkasteltujen voimaloiden ilmeinen nimellisteho.

Kaikilla tarkastelluilla voimaloilla kuviossa 1 kuvattu käynnistystuulennopeus asettuu hieman yli 3 m/s tuulennopeuteen. Samoin kaikilla tarkastelluilla voimaloilla on kuvion 1 mukainen jotakuinkin samansuuruinen nimellistuulennopeus, joka on noin 8 m/s.

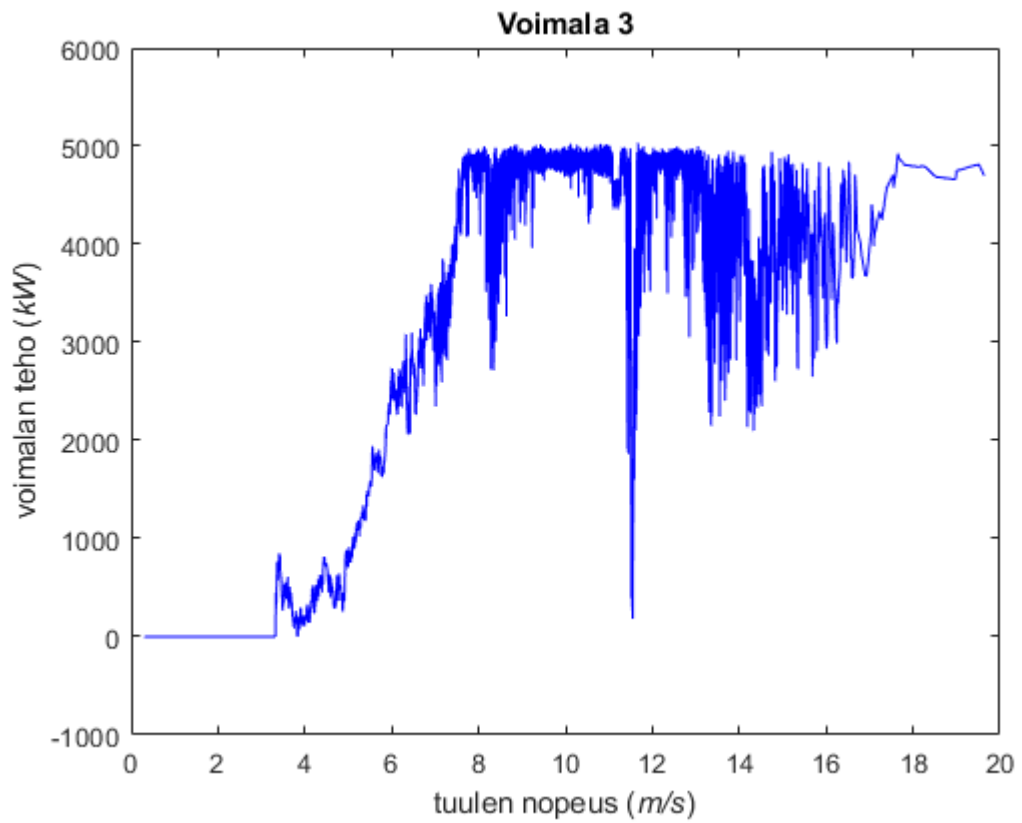
Poikkeamat ideaaliseen tehontuottokäyrään verrattaessa johtuvat osaltaan tuulen turbulenttisesta luonteesta ja voimalan hitaudesta vastata tuulennopeuksien äkillisiin vaihteluihin. Voimalan roottorin massa on hidas reagoimaan. Lisäksi tuulen suunnan suuremmat vaihtelut aiheuttavat tarpeen kääntää koko tuulivoimalan nasellia kohti muuttunutta tuuleen suuntaa.



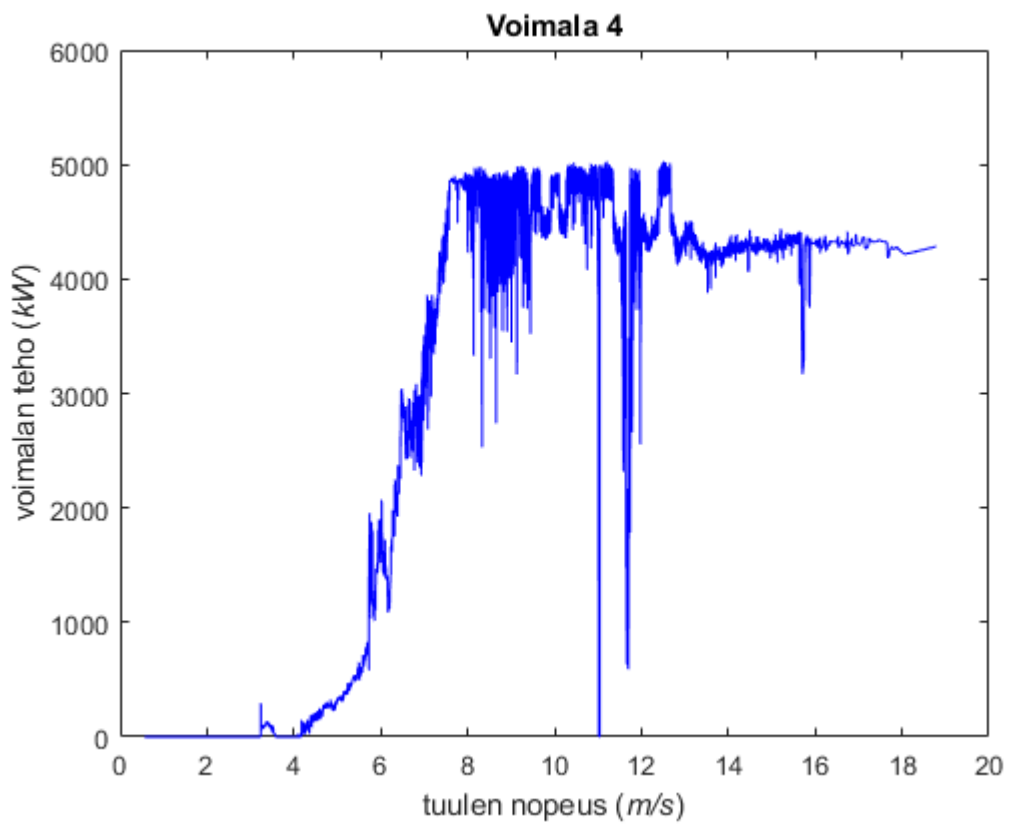
KUVIO 2, Voimalan 1 toteutunut tehontuottokäyrä.



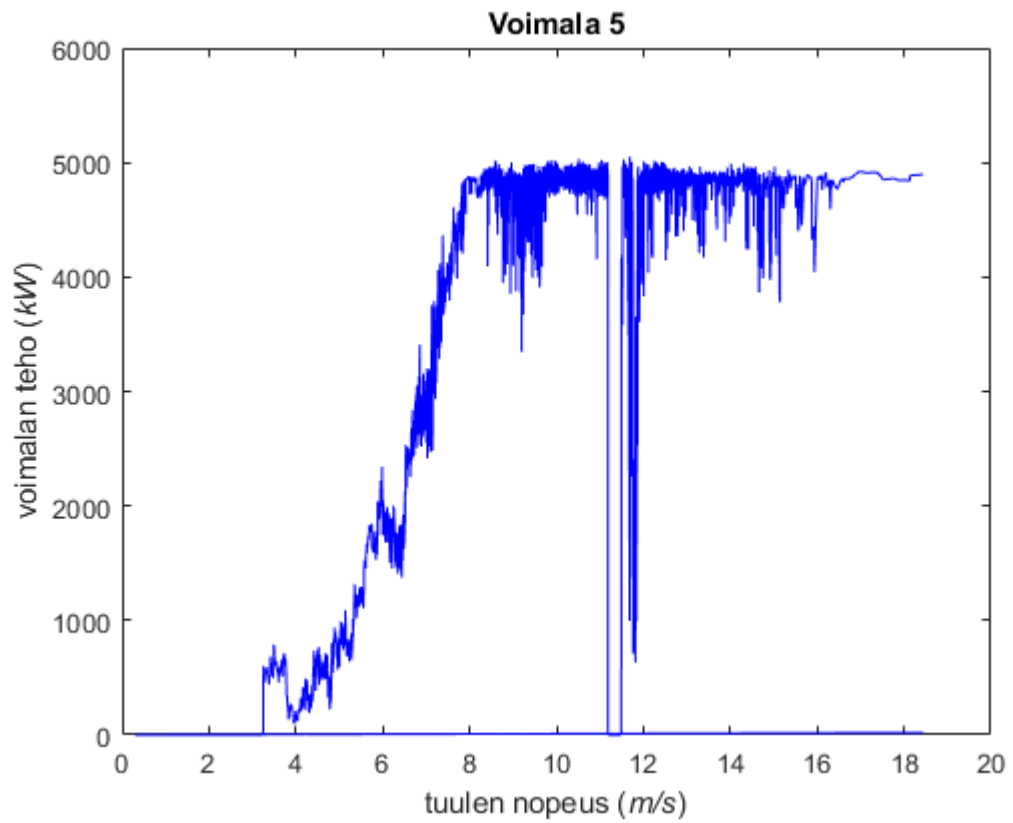
KUVIO 3, Voimalan 2 toteutunut tehontuottokäyrä.



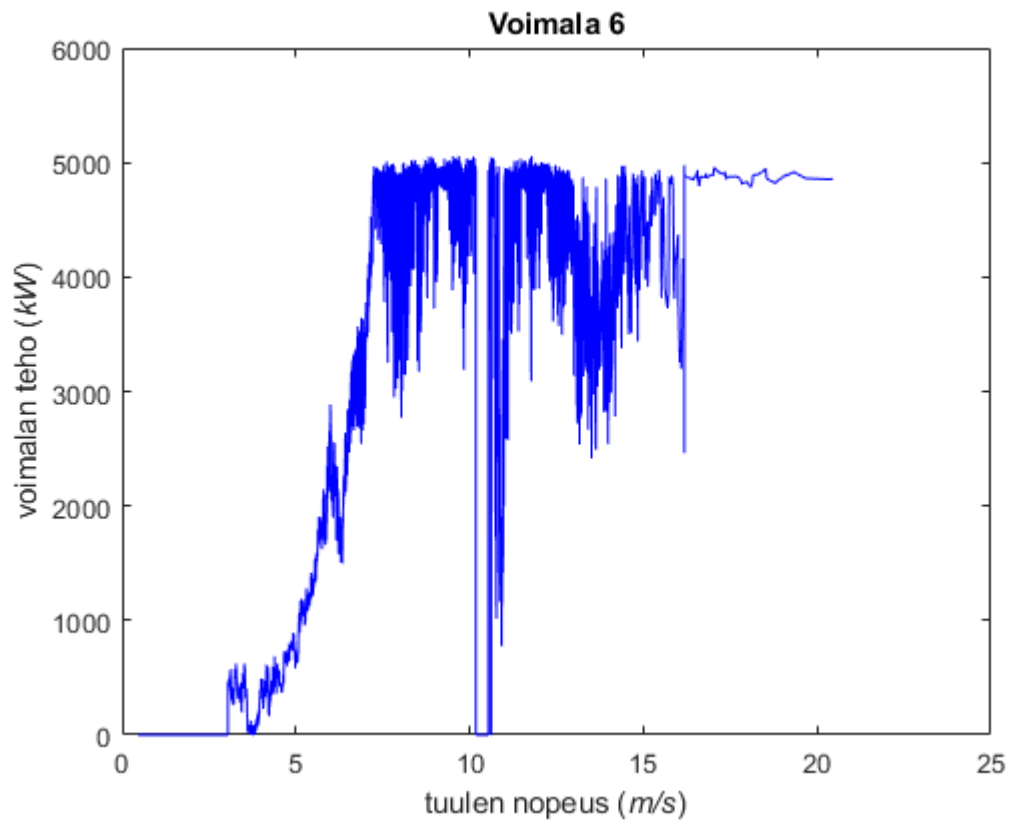
KUVIO 4, Voimalan 3 toteutunut tehontuottokäyrä.



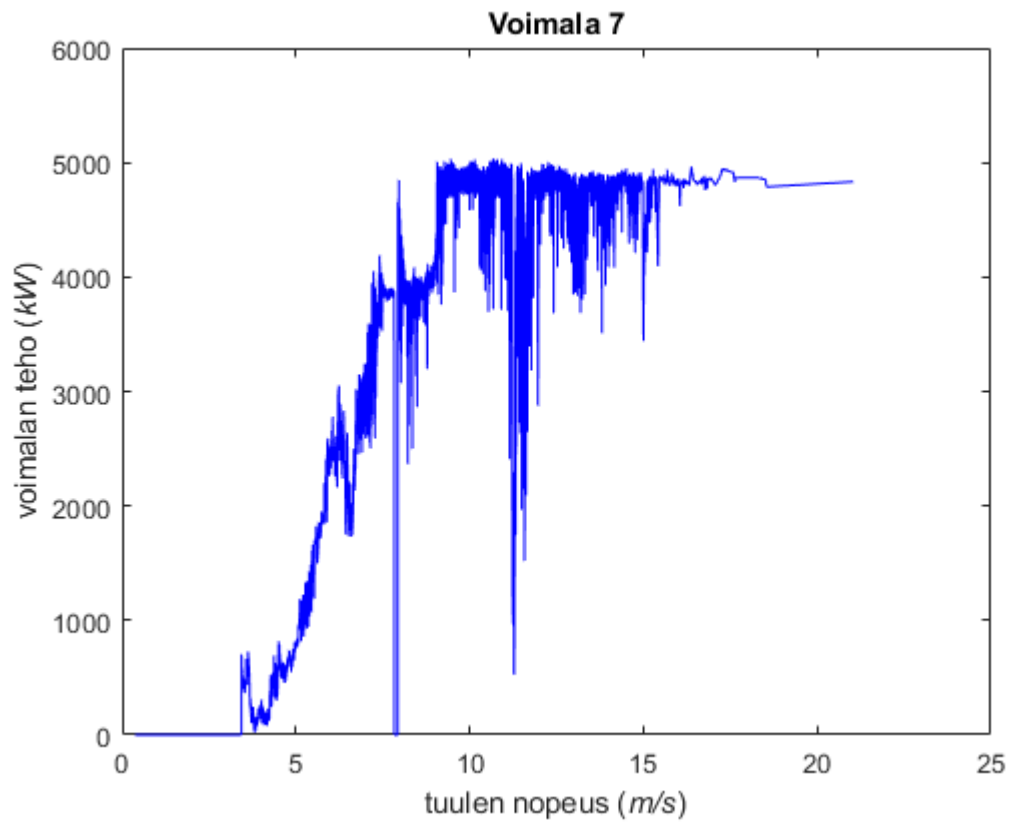
KUVIO 5, Voimalan 4 toteutunut tehontuottokäyrä.



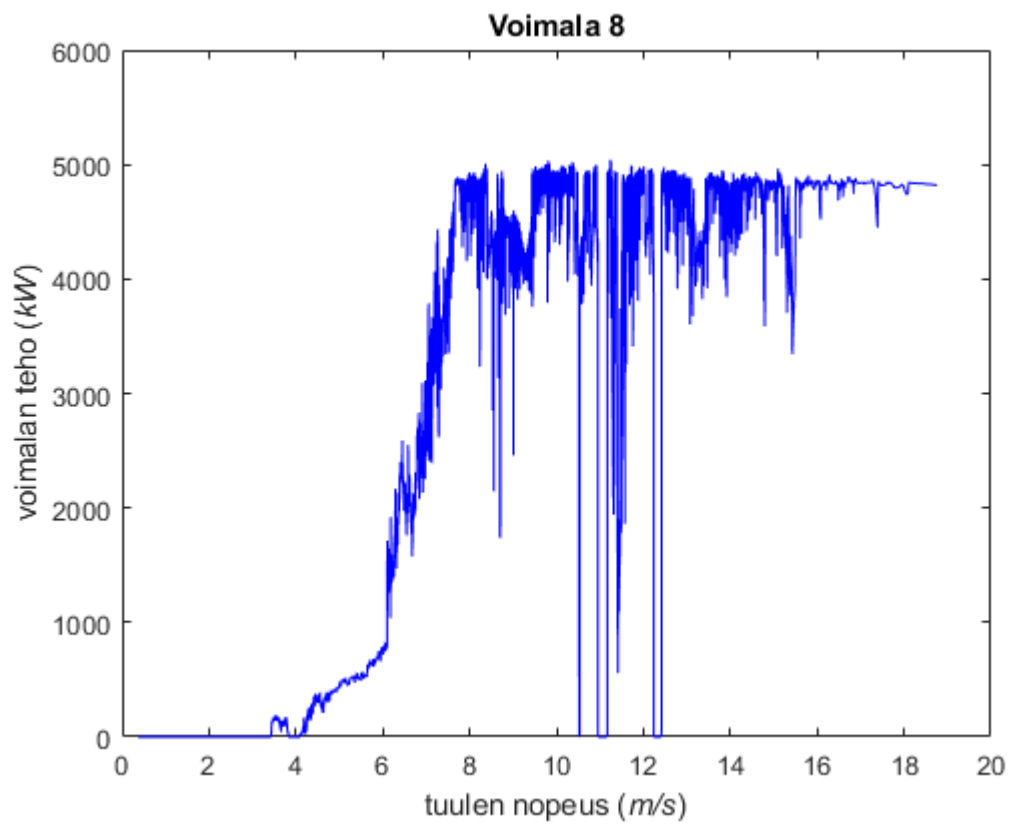
KUVIO 6, Voimalan 5 toteutunut tehontuottokäyrä.



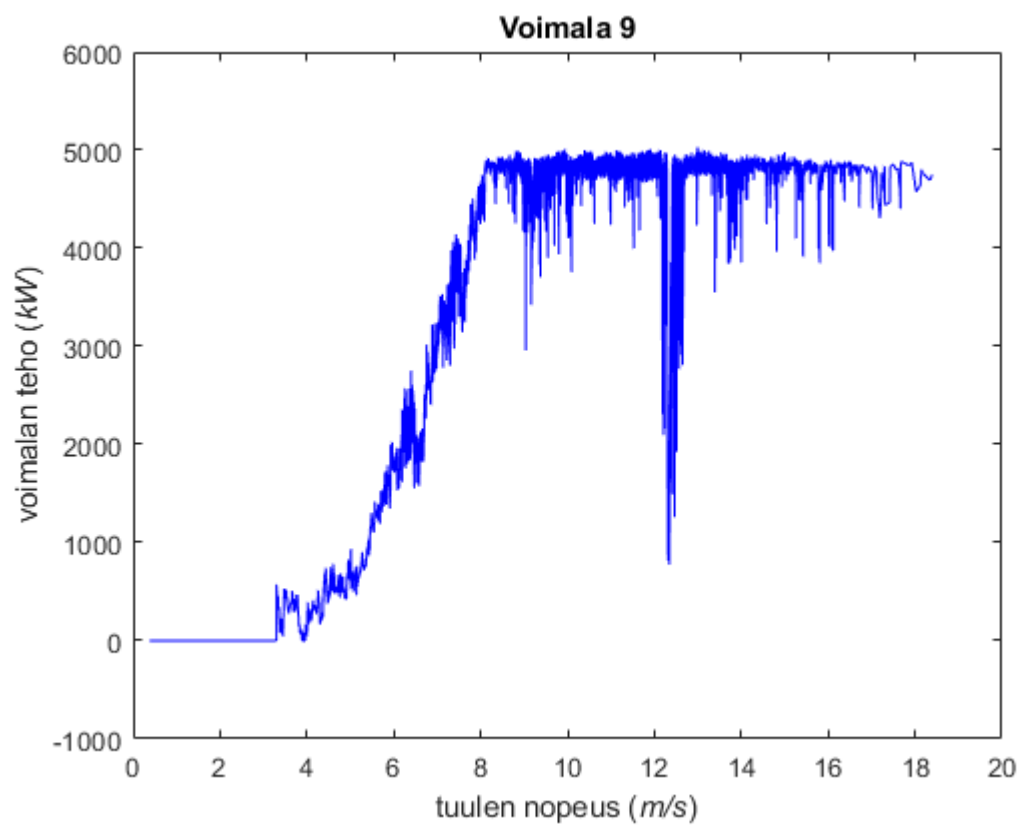
KUVIO 7, Voimalan 6 toteutunut tehontuottokäyrä.



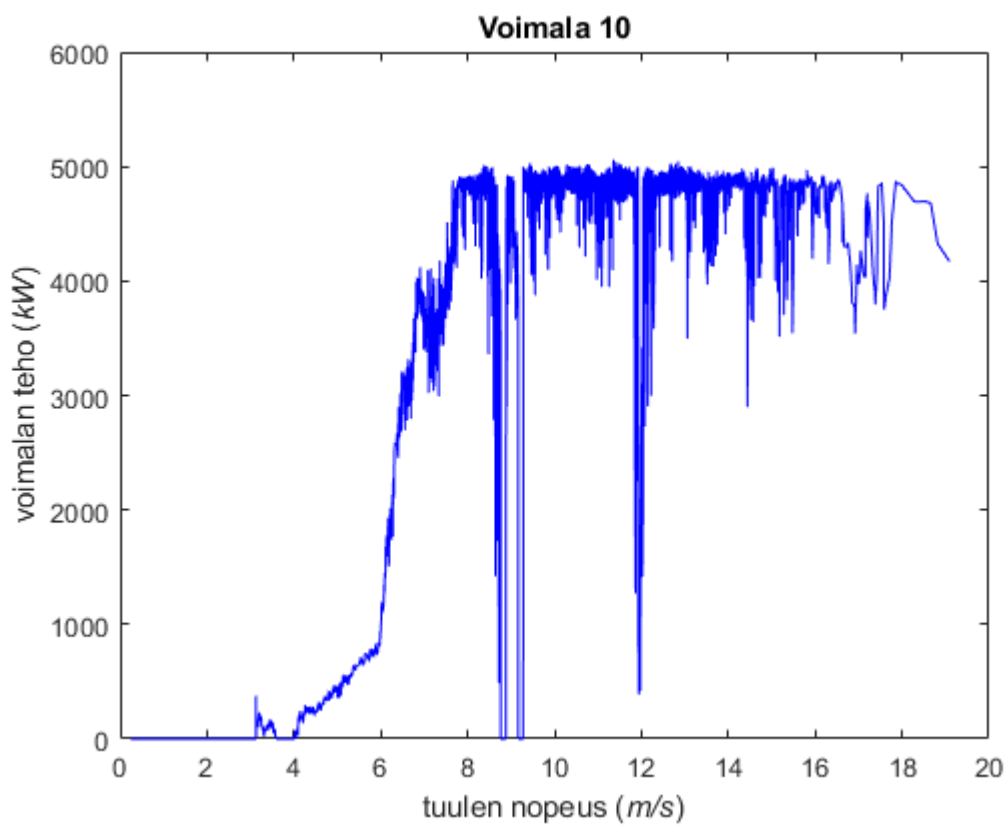
KUVIO 8, Voimalan 7 toteutunut tehontuottokäyrä.



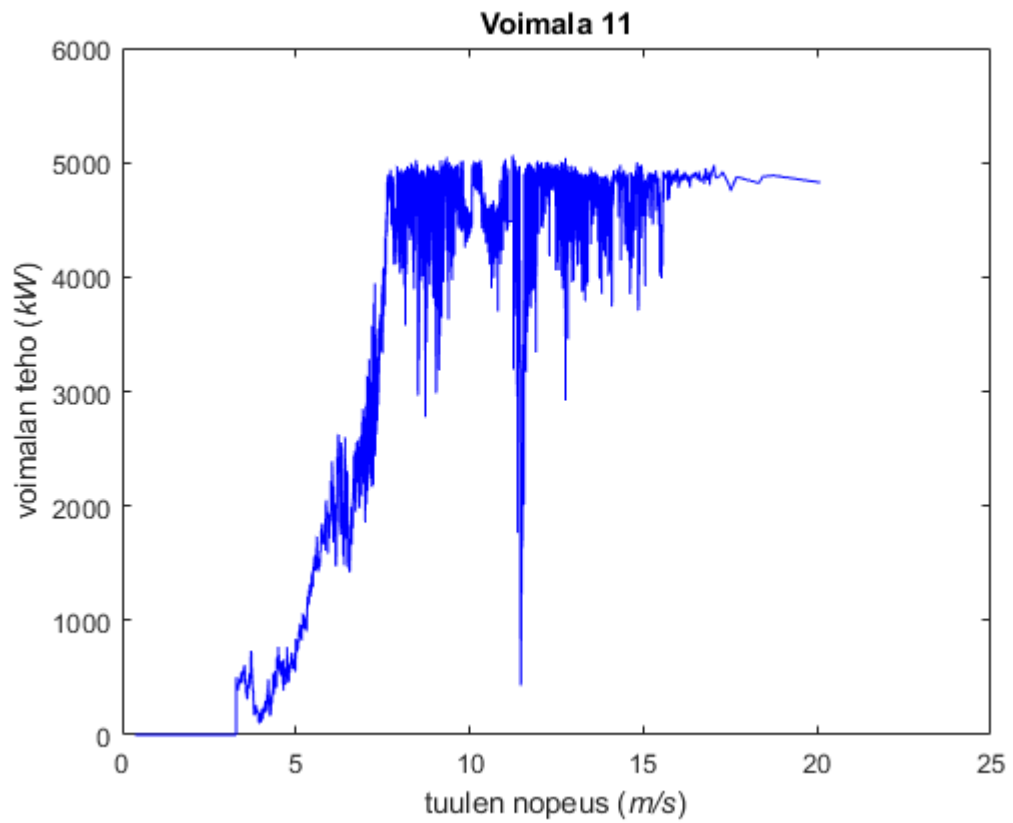
KUVIO 9, Voimalan 8 toteutunut tehontuottokäyrä.



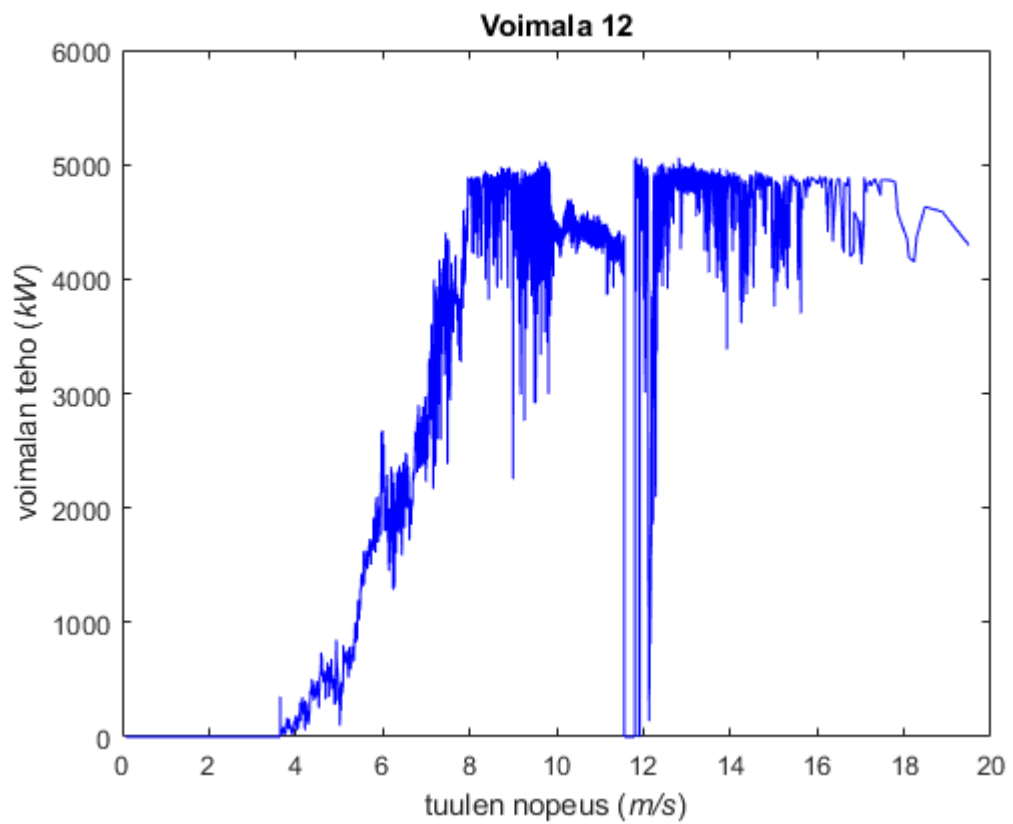
KUVIO 10, Voimalan 9 toteutunut tehontuottokäyrä.



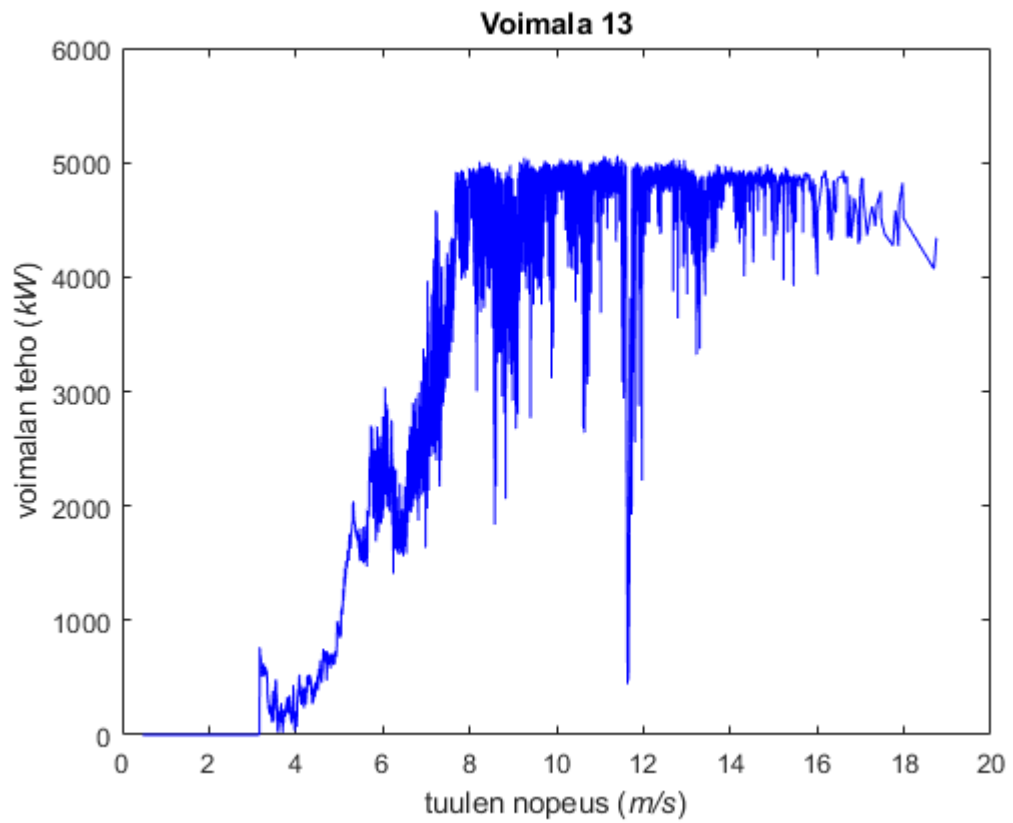
KUVIO 11, Voimalan 10 toteutunut tehontuottokäyrä.



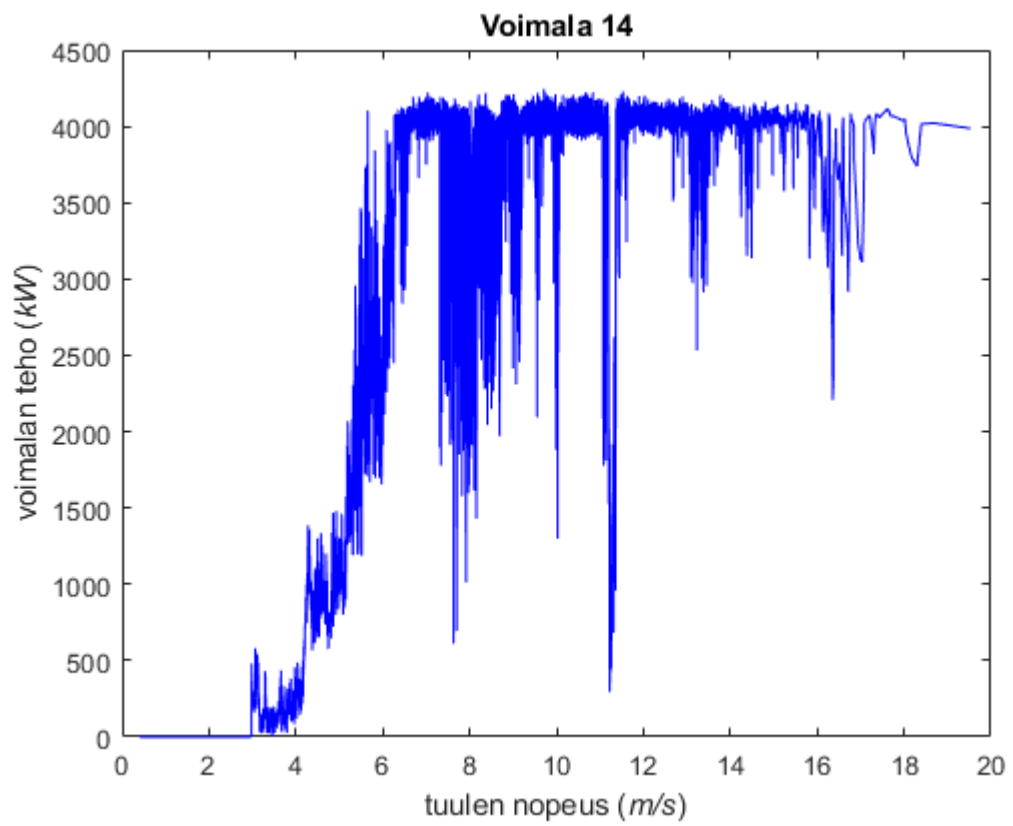
KUVIO 12, Voimalan 11 toteutunut tehontuottokäyrä.



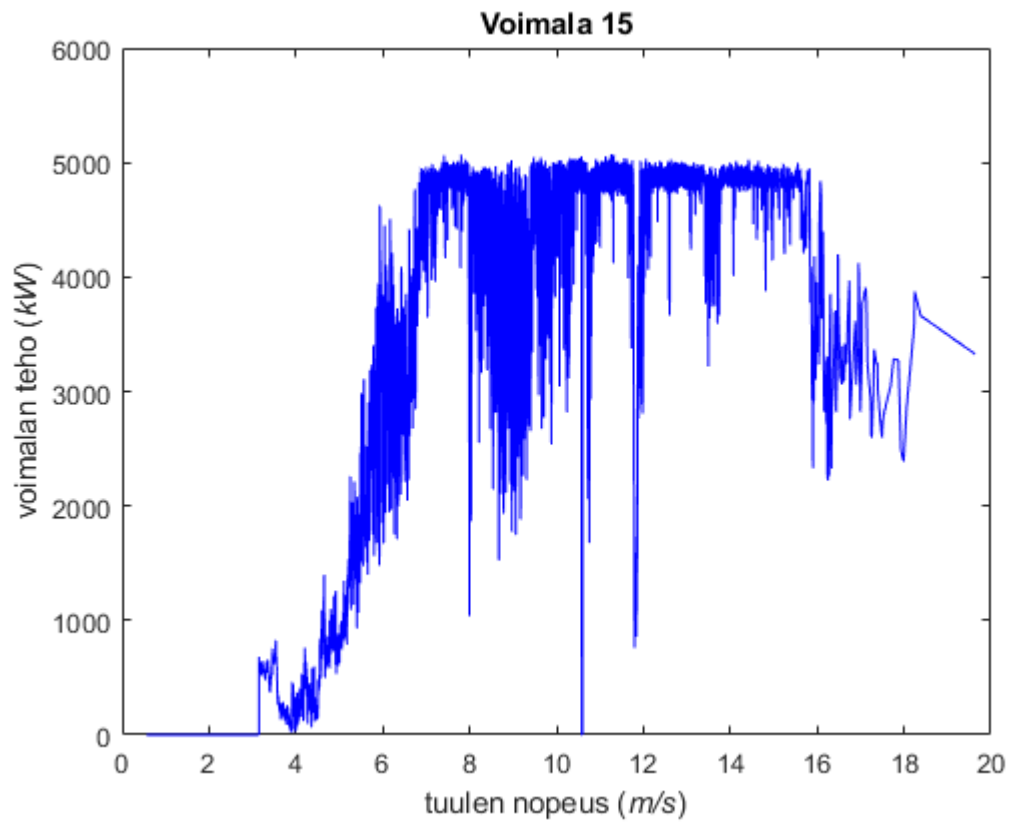
KUVIO 13, Voimalan 12 toteutunut tehontuottokäyrä.



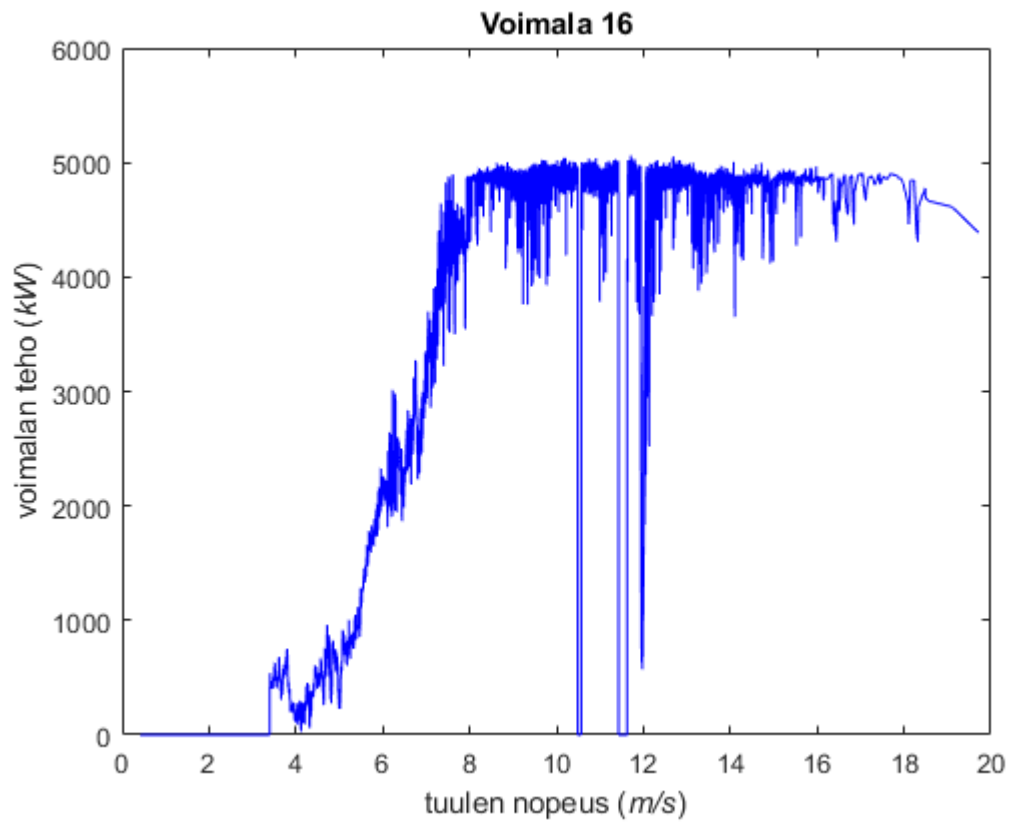
KUVIO 14, Voimalan 13 toteutunut tehontuottokäyrä.



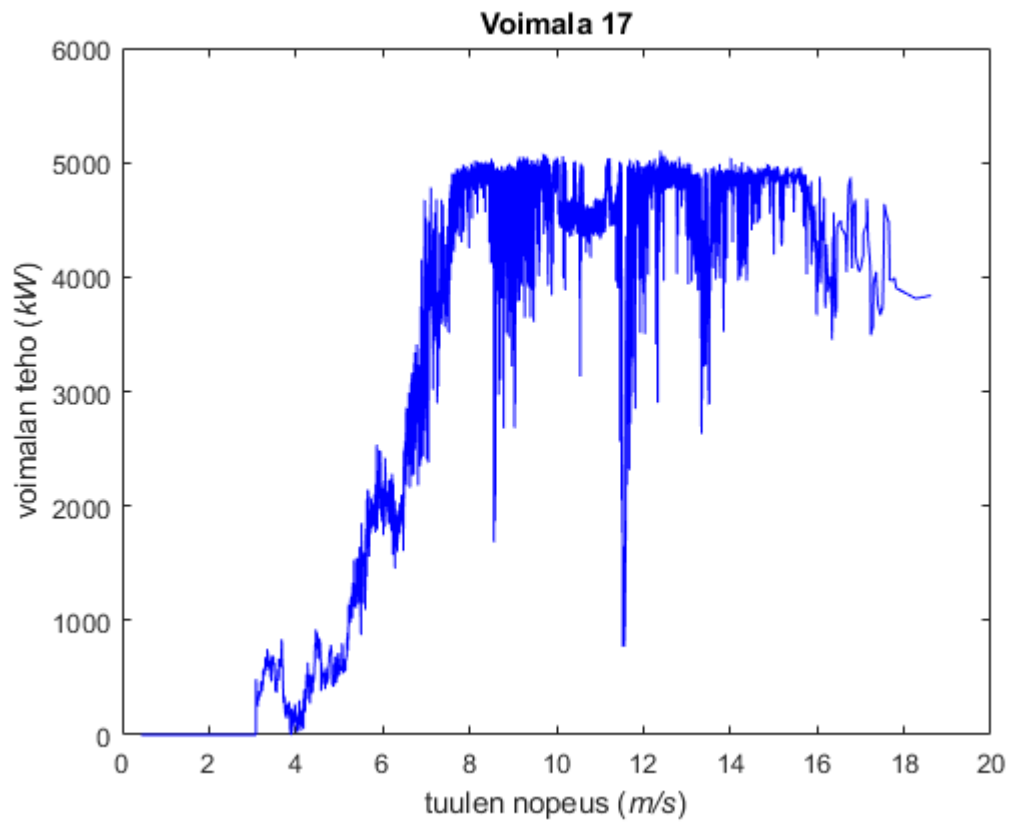
KUVIO 15, Voimalan 14 toteutunut tehontuottokäyrä.



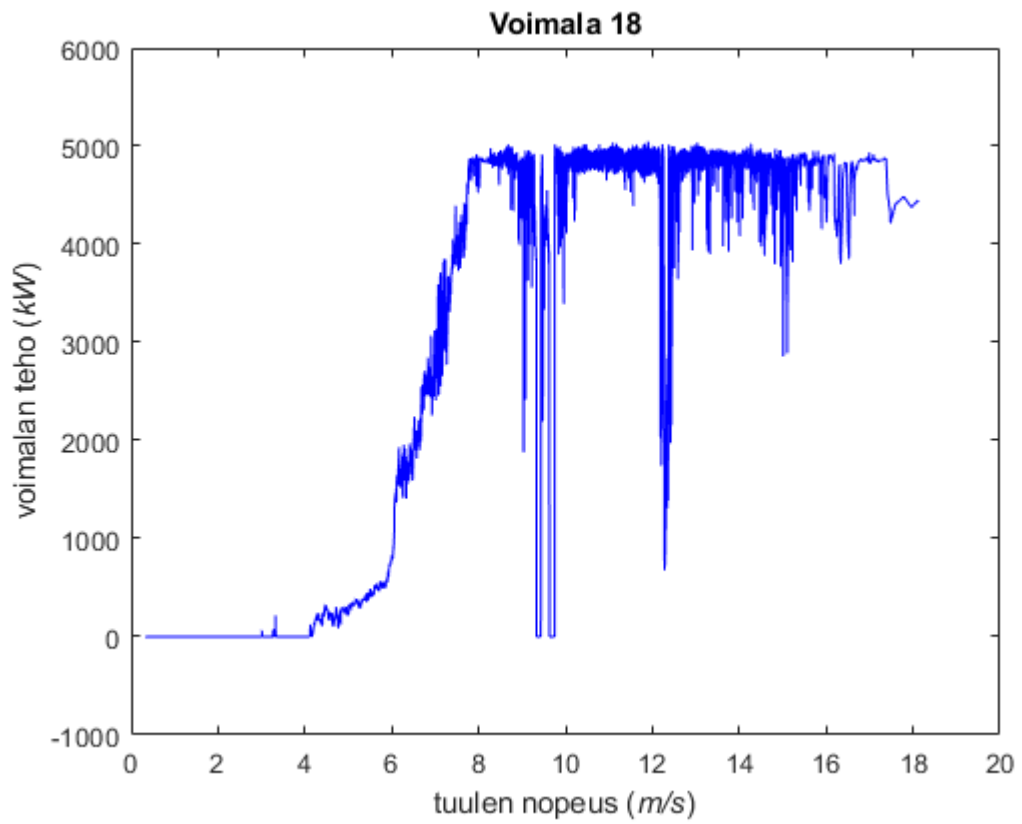
KUVIO 16, Voimalan 15 toteutunut tehontuottokäyrä.



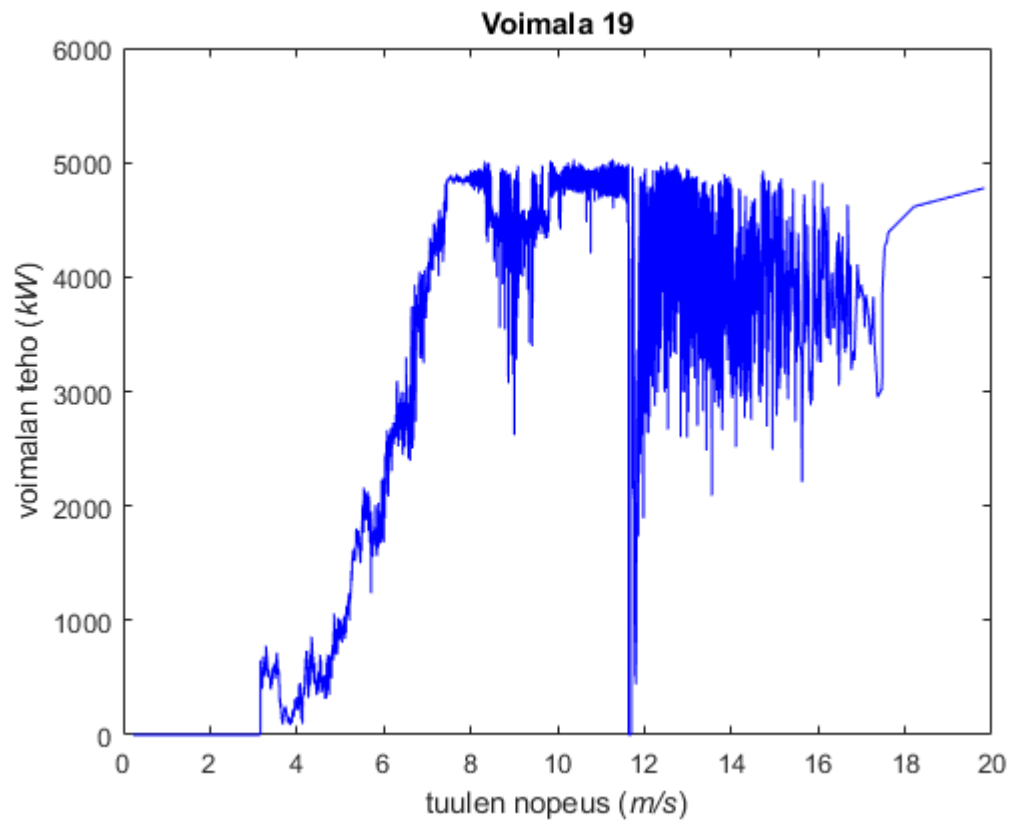
KUVIO 17, Voimalan 16 toteutunut tehontuottokäyrä.



KUVIO 18, Voimalan 17 toteutunut tehontuottokäyrä.



KUVIO 19, Voimalan 18 toteutunut tehontuottokäyrä.



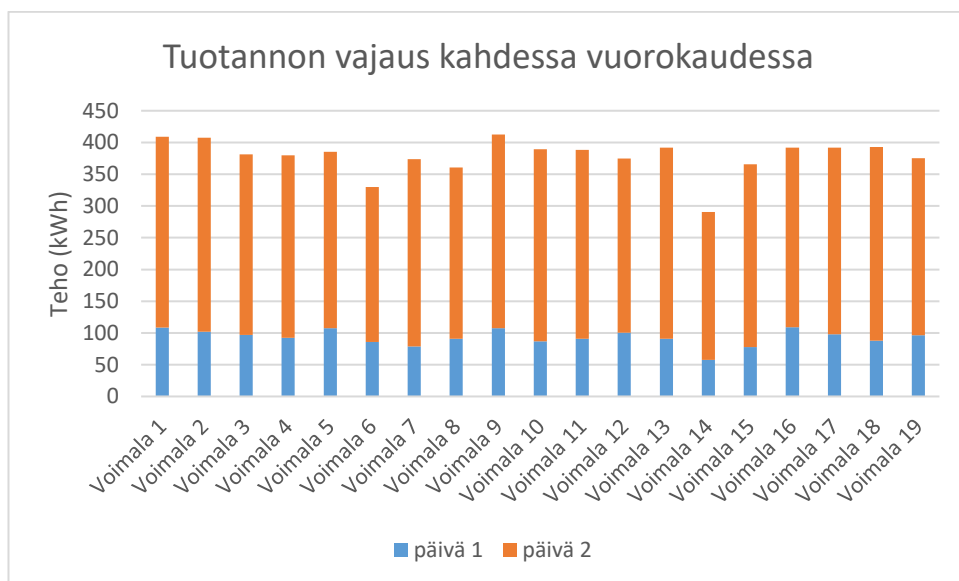
KUVIO 20, Voimalan 19 toteutunut tehontuottokäyrä.

4 HYÖDYNTÄMÄTTÄ JÄÄNYT TEHONTUOTTO

Toinen tarkastelun kohteena ollut asia oli, kuinka paljon jäi tehoa tuottamatta tilanteessa, jossa ollaan nimellistuulennopeuden yläpuolella, mutta voimalan tehontuotto syystä tai toisesta on pienempi. Tämän laskemiseksi suodatettiin aineistosta ensin pois arvot, jotka ovat nimellistuulennopeuden alapuolella, koska aineiston mukana ei ollut tarkempia teknisiä tietoja voimaloista, joita olisi tarvittu kunkin voimalan ideaalin tehontuottokäyrän määrittelemiseksi.

Kunkin voimalan toteutunutta tehontuottokäyrää tarkastelemalla voidaan päätyä siihen, että likimain 8 m/s on sellainen tuulennopeus, jossa kaikki voimalat ovat saavuttaneet nimellisen tehontuottonsa. Tätä pienempien tuulennopeuksien tehontuottoa varten olisi pystyttävä määrittämään tarkka teoreettinen käyrä alkupään nopeuksien osalta.

Kuvio 21 vastaa siis kysymykseen, paljonko tehoa voimalasta olisi saatu enemmän mittausjakson aikana, mikäli todellinen tehontuotanto olisi vastannut ideaalista tehokäyrää nimellistuulennopeuden yläpuolella. Ensimmäisenä päivänä vajeus on noin 100 kWh ja toisena päivänä noin 300 kWh.



KUVIO 21, Tehotuotannon vajeus nimellistuulennopeudella

5 TULOSTEN ANALYYSI

Johtuen alkuperäisen aineiston rajoittumisesta vain tuulennopeuden ja tehon keskiarvomittauksiin kymmenen sekunnin ajanjaksoissa, ei tuloksista päästä arvioimaan kovin tarkasti tuottokäyrän alkuosan toteutunutta energiantuotantoa. Tässä työssä on rajattu tarkasteltava alue siitä syystä vain ajanhetkiin, kun toimitaan nimellistehoalueella.

Etukäteen oli tiedossa, että voimaloiden nimellisteho on 5 MW. Lisäksi oli tiedossa, että voimalat sijaitsevat eräässä samassa suomalaisessa tuulipuistossa.

5.1 Tehontuottokäyrät

Tehontuottokäyrät on muodostettu suhteessa tuulennopeuteen. Toteutuneista mittauksista voidaan huomata, että on paljon ajanhetkiä, kun täyteen viiden megawatin tehoon ei päästä. Tuntematta olosuhteita tai tarkempia voimalan teknisiä tietoja, voidaan vain yleisesti todeta, että mahdollisia syitä tehon hetkelliseen putoamiseen kovalla tuulella voi löytyä esimerkiksi turbulenttisesta tuulesta, jolloin tuulen suunta muuttuu äkisti, eikä voimalan kääntömoottorit ehdi reagoimaan kaikkiin suunnanmuutoksiin, jotta ilmavirran kohtauskulma olisi optimaalinen lapoihin nähden.

Lisäksi lapakulmien mahdollinen säätö voi samaten reagoida liian hitaasti muutoksiin. Myös tuulen nopeudessa voi esiintyä vaihteluita, eikä roottorin pyörimisnopeus massansa ja kitkavoimiensa takia ehdi pysyä vaihteluiden mukana.

5.2 Saavuttamatta jäänyt teho

Toisena tutkittavana asiana oli laskea, paljonko jäätin tehontuotannossa maksimitehosta, joka olisi saavutettu nimellistuulennopeuden yläpuolella, mikäli voimala olisi ideaalinen. Johtuen edellä mainituista puutteista aineistossa, nimellistuulennopeuden alapuolella olevaa ideaalikäyrää pystytti määrittelemään kullekin voimalalle, se alue jätettiin pois.

Kuviosta 21 huomaamme, että ensimmäisen päivän tehovajaus on paljon pienempi kuin toisen päivän. Tarkastelujaksolla ensimmäisenä päivänä kaikissa voimaloissa on vasta iltapäivällä mitattu nimellisiä teholumia, kun taas toisena vuorokautena tuuli lähes koko vuorokauden nimellinopeudella. Tällöin koska ensimmäisenä päivänä ei esiintynyt ajallisesti yhtä kauan nimellisiä tuulennopeuksia, ei myöskään saavuttamaton teho kasvanut suureksi. Tässä huomataan juuri tuuliolosuhteiden vaikutus rajusti tuotantoon.

Tuulivoimaloiden tyypillinen huipunkäyttöaika on 2500–3000 tuntia. Huipunkäyttöaika tarkoittaa sitä tuntimäärää, joka voimalan tulee toimia nimellistehollaan, jotta todellinen vuosituotanto toteutuisi. Käytännössä tuulivoimalat kuitenkin tuottavat valtaosan energiastaan nimellistehon alapuolella, joten nimellisteholla vietettyjä tunteja tulee todellisuudessa selvästi huipunkäyttöaikaa vähemmän. Huipunkäyttöaika on kuitenkin kätevä suure vuosituotannon arvioinnissa, sillä vuotuinen energiantuotanto saadaan nimellistehon ja huipunkäyttöajan tulona. Jos huipunkäyttöajaksi oletetaan 3000 h, 5 MW:n voimalan vuosituotannoksi saadaan siis 15000 MWh.

Tarkastellaan vielä, miten luvussa 4 esitetyt tehovajaukset näkyvät vuosituotannossa. Jos oletetaan, että päivittäinen 100 kWh:n energiavaje toteutuu vuoden jokaisena päivänä, vuotuiseksi energiavajeeksi saadaan 36500 kWh, joka on 0,24 % vuosituotannosta. Ja kun vastaava tarkastelu tehdään 300 kWh:n päivittäiselle energiavajeelle, vuotuiseksi energiavajeeksi saadaan 109500 kWh, joka on 0,73 % vuosituotannosta. Suhteelliset energiamenetykset vaikuttavat siis melko pieniltä, mutta rahallisesti kyseessä on silti jossain määrin merkittävä tekijä, sillä esimerkiksi energian hinnalla 80 €/MWh puhutaan noin 3000–9000 €:n vuosittaisista menetyksistä.

6 POHDINTA

Tuulivoima on uusiutuva energiamuoto, jossa ilmavirran liike muutetaan pyöriväksi liikkeeksi ja tämä liike generaattorissa sähköksi. Tällä tavalla osa tuulen liike-energiasta on mahdollista ottaa talteen. Tehontuotantoa voidaan mallintaa mekaniikan ja virtausoppien mukaisilla yhtälöillä. Näitä yhtälöitä soveltamalla voidaan piirtää kuvion 2 mukainen ideaali tehokäyrä, joka ei ota huomioon voimalan häviöitä, eikä todellisten tuuliolosuhteiden kaoottisuutta.

Tehontuotantoa joudutaan myös rajoittamaan, tavoiteltaessa mahdollisimman kustannustehokkaasti rakennettua voimalaa. Tähän on käytettävissä erilaisia menetelmiä, riippuen jälleen siitä, miten voimalaa halutaan optimoida kustannustehokkuuden suhteen.

Lähdeaineistossa olevat mitatut teholutemat järjestettiin suhteessa tuulennopeuteen, ja näin voitiin muodostaa kullekin voimalalle toteutunut tehontuottokäyrä. Käyrien muodoista huomataan, että toteutunut käyrä ei vastaa ideaalia, vaan siinä on nähtävissä poikkeamia, jotka johtuvat yleensä voimalan hitaudesta reagoida tuulen muutoksiin. Aineistossa ei esiintynyt pidempiä katkoksia tehontuotannossa, mikä viittaisi siihen, että varsinaisia vikoja ei esiintynyt tarkastelujaksolla.

Aineistosta voitiin myös laskea, paljonko tehoa voimalasta olisi saatu enemmän, mikäli todellinen tehontuotanto olisi vastannut ideaalista tehokäyrää nimellistuulennopeuden yläpuolella. Koska voimaloista ei tiedetty nimellistehoa tarkempia tietoja, voitiin tämä siksi laskea vain nimellistehon alueella. Huomionarvoista on, että ensimmäisen päivän lukemat näyttävät pienemmiltä, koska tällöin esiintyi huomattavasti enemmän nimellistä alhaisempia tuulennopeuksia, jolloin ei saavutettu niin suurta osaa ajasta nimellisnopeuden alueella. Mikäli kaikki päivät olisivat samanlaisia, olisi ensimmäisen päivän tuotannon vajauksella 0,24 % vaikutus vuosituotantoon. Vastaavasti toisen päivän tehontuottovajaus koko vuoteen suhteutettuna tarkoittaisi 0,73 % laskua vuosituotantoon.

Tämä työ on Tampereen Ammattikorkeakoulun toimeksi antama tutkimus erään tuulivoimapuiston voimaloiden tehontuottokäyrän selvittämiseksi. Vaikka toimitettu materiaali olikin hyvin suppea, riitti siinä kiitettävästi tutkittavaa ja analysoitavaa. Mitään kovin pitkälle vietyjä johtopäätöksiä aineistosta ei valitettavasti voi tehdä tarkempien teknisten tietojen puutteen vuoksi. Myöskään voimaloiden sijainnista ei ollut toimitettu tietoa. Itse työ sujui hyvin ja tietoa on hyvin saatavilla, josta kiitos lähinnä työn ohjaajan, Aki Korpelan erittäin seikkaperäisesti laaditun oppikirjan johdosta. Työ tarjosi sopivasti haastetta ja mielenkiintoisen oppimiskokemuksen. Työssä oli hyvää, että sai vastata konkreettiseen tosielämän tiedon tarpeeseen.

LÄHTEET

Aki Korpela, 2014. Tuulivoiman perusteet, Tammertekniikka

Esko Valtanen, 2013. Tekniikan taulukkokirja, Genesis-kirjat

Tuulivoimayhdistys. n.d. Tuulivoimatuotannon vaihtelevuus. Verkkosivu. Viitattu 6.6.2022.

<https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatuotanto/tuulivoimatuotannon-vaihtelevuus>