



TAMPEREEN  
AMMATTIKORKEAKOULU

# HAJAUTETUN ENERGIATUOTANNON VERKKOMALLI

Juuso Hannula

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2017  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Sähkövoimatekniikan suuntautumisvaihtoehto



## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Sähkövoimatekniikan suuntautumisvaihtoehto

HANNULA, JUUSO:  
Hajautetun energiantuotannon verkkomalli

Opinnäytetyö 35 sivua, joista liitteitä 2 sivua  
Toukokuu 2017

---

Tämä opinnäytetyö liittyy Tampereen ammattikorkeakoulun (TAMK) sähkövoimatekniikan laboratorion kehittämiseen. TAMK:iin rakennetaan Greenlab-niminen uusiutuvien sähköenergiatekniologioiden oppimisympäristöä, ja tämän opinnäytetyön tarkoitus oli rakentaa hajautetun energiantuotannon toimintaa havainnollistava laboratoriomallin prototyyppi.

Malli sisältää simuloitua aurinko- ja tuulienergian tuotantoa liitettynä resistansseilla toteutettuun kulutusta mallintavaan kuormaan, sekä myös jakeluverkon simuloinnin. Lopullinen malli tulee osaksi laboratorioskurssien harjoitustöitä, joissa opiskelijat tekevät työhön liittyviä mittauksia ja raportoivat työn tulokset.

Lopullisen automatiikkaa ja tietotekniikkaa sisältävän mallin suunnitelma oli liian laaja yhdelle opinnäytetyölle, joten tämä opinnäytetyö rajattiin yksinkertaisen fyysisen laboratoriomallin rakentamiseen. Projektissa ilmeni kuitenkin lukuisia ongelmia, joiden vuoksi mallin prototyypistä poistettiin automaation ja etäohjauksen ominaisuudet. Lopulta päädyttiin käyttämään TAMK:n sähkövoimatekniikan laboratorion jo valmiiksi löytyviä laitteita uusien osien hankkimisen sijaan.

Ongelmista ja rajoituksista huolimatta alustava malli saatiin rakennetuksi, mikä antoi paremman ymmärryksen mallin eri osien toiminnasta. Prototyyppimalli onnistui täyttämään tärkeimmät sille asetetut tavoitteet, vaikka se erosikin alkuperäisestä suunnitelmasta. Prototyypille tärkeiksi luokitellut ominaisuudet toimivat lopulta hyväksytysti, joten niitä voidaan tulevaisuudessa kehittää.

---

Avainsanat: hajautettu tuotanto, prototyyppi, verkkomalli, tehotasapaino, kysyntäjousto

## **ABSTRACT**

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

HANNULA, JUUSO:

Power grid model for distributed energy production

Bachelor's thesis 35 pages, appendices 2 pages

May 2017

---

This thesis is part of ongoing development of the power engineering lab of Tampere university of applied sciences (TAMK). TAMK is constructing a renewable energy technology learning environment named Greenlab, and the purpose of the thesis was to build a prototype laboratory model that demonstrates how distributed energy generation works.

It includes simulated solar and wind power generation connected to a modifiable resistance acting as a load, as well as a simulated distribution grid. The final model will become part of laboratory course experiments, where students take practical measurements and write reports on their findings.

The plan for the final model, which included automation and information technology, was deemed too extensive for the scope of one thesis. Due to so this, the thesis focused only on creating a simplistic proof of concept laboratory model. However the project ran into numerous problems that eventually lead to cutting features such as automation and remote control from the prototype. It was eventually decided to only use equipment that already exists in the TAMK power engineering laboratory instead of specifically ordering them for the project.

Despite the problems and limitations, a functioning rudimentary model was constructed, which helped better understand how each component of the model worked. The prototype managed to fulfill its requirements even though it didn't end up as originally designed. The few features deemed important for the prototype ended up functioning in a satisfactory manner, so they can be improved upon in the future.

---

Key words: dispersed production, prototype, grid model, power balance, load balancing

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	HAJAUTETTU ENERGIANTUOTANTO YLEISESTI .....	7
2.1	Hajautetun energiantuotannon määritelmä .....	7
2.2	Hajautetun tuotannon energianlähteet.....	8
2.2.1	Aurinkoenergia.....	8
2.2.2	Pientuulivoima .....	9
2.2.3	Pienvesivoima .....	9
2.2.4	Hajautetut lämpölaitokset .....	10
2.3	Kysyntäjousto ja tehotasapaino .....	10
3	LABORATORIOMALLIN SUUNNITTELU .....	11
3.1	Mallin osat ja halutut ominaisuudet.....	11
3.1.1	Verkko ja perusvoima .....	11
3.1.2	Hajautettu tuotanto .....	12
3.1.3	Verkon kuorma.....	12
3.1.4	Laboratoriotyöhön sisältyviä mittauksia .....	13
3.2	Alkuperäinen visio valmiista mallista.....	13
3.3	Lopullinen suunnitelma prototyypille.....	14
4	LABORATORIOMALLIN RAKENNUS .....	15
4.1	Jakeluverkko ja verkon kuorma .....	15
4.1.1	Tahtikoneen asennus ja toimintaperiaate .....	16
4.1.2	Servomoottorin ohjaus ja parametrit .....	18
4.1.3	Kuorma.....	20
4.1.4	Verkon ylikuormatilanteen toteutus .....	21
4.2	Aurinkovoiman toteutus .....	23
4.2.1	Tahdistus verkkoon .....	24
4.3	Tuulivoiman toteutus .....	26
4.4	Säätövoima.....	29
5	MALLIN TARKASTELO JA KEHITYS.....	30
5.1	Ratkaistavat ongelmat.....	30
5.2	Laboratoriotyön kannalta hyödyllisiä mittauksia .....	31
6	YHTEENVETO .....	32
	LÄHTEET.....	33
	LIITTEET .....	34
	Liite 1. Prototyypin piirikaavio .....	34
	Liite 2. Ylikuormatilanteen mittaustulokset.....	35

**ERITYISSANASTO tai LYHENTEET JA TERMIT (valitse jompikumpi)**

Jakeluverkko	Keskijänniteverkko, siirtää sähköä keskipitkiä matkoja kuluttajien pienjännite liittymiin
kVA	kilovolttiampeeri, näennäistehon yksikkö
Generaattori	Sähköä tuottava mekaaninen kone
Induktio	Sähkökentän syntyminen muuttuvan magneettikentän avulla
Pääjännite	Kahden vaiheen välinen jännite
Vaihejännite	Vaiheen ja nollan välinen jännite
Invertteri	Vaihtosuuntaaja, muuntaa tasasähkön vaihtosähköksi
Moduulinen	Erillisistä kokonaisuuksista koostuva

## 1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä käydään läpi Tampereen ammattikorkeakoululle suunnitellun hajautetun energiantuotannon verkkomallin prototyypin toteutus. Opinnäytetyön raportti toimii myös rakennetun mallin dokumentointina, jotta sitä on helpompi jatkaa ja kehittää tulevaisuudessa.

Malli tulee valmistuttuaan osaksi TAMKIn sähkövoimatekniikan laboriokurssien mittaustöitä, eli sen tarkoitus on kehittää insinöörien koulutusta hajautetun tuotannon ja sen toiminnan ymmärtämiseen käytännöllisten mittausten avulla. Aiheesta on TAMKIn sähkövoimatekniikan opetussuunnitelmassa teoriaa käsittelevä kurssi, joten tämä malli mahdollistaa aiheen konkreettisen tutkimisen.

Jotta opinnäytetyössä tuotetun laboriomallin idea ja sen eri osien merkitys tulisi selväksi, käydään ensin läpi, mitä hajautettu energiantuotanto tarkoittaa ja mitä osia siihen kuuluu. Eri energiantuotantotavat mainitaan lyhyesti niihin syventymättä, mutta mallinnettaviin tuotantotapoihin perehdytään tarkemmin suunnittelussa.

Suunnitteluun omistetussa luvussa käydään läpi lopullisen laboriomallin tarkoitus ja päämäärä, sekä tähän opinnäytetyöhön rajatun osuuden sisältö. Työn kulkiessa ilmenneiden ongelmien takia lopullinen suunnitelma toteutettiin mallia rakentaessa, joten tämä luku sisältää lähinnä ohjeita mallille yleisesti.

Suurin osa opinnäytetyötä oli itse mallin kasaus, joka on dokumentoitu kokonaisuudessaan luvussa neljä. Tähän kuuluvat valittujen energiantuotantojen toteutustavat, laitteistojen kytkentä, sekä eri komponenttien vaatimat parametrit. Laitteiston eri osat on talti-oitu myös kuvina.

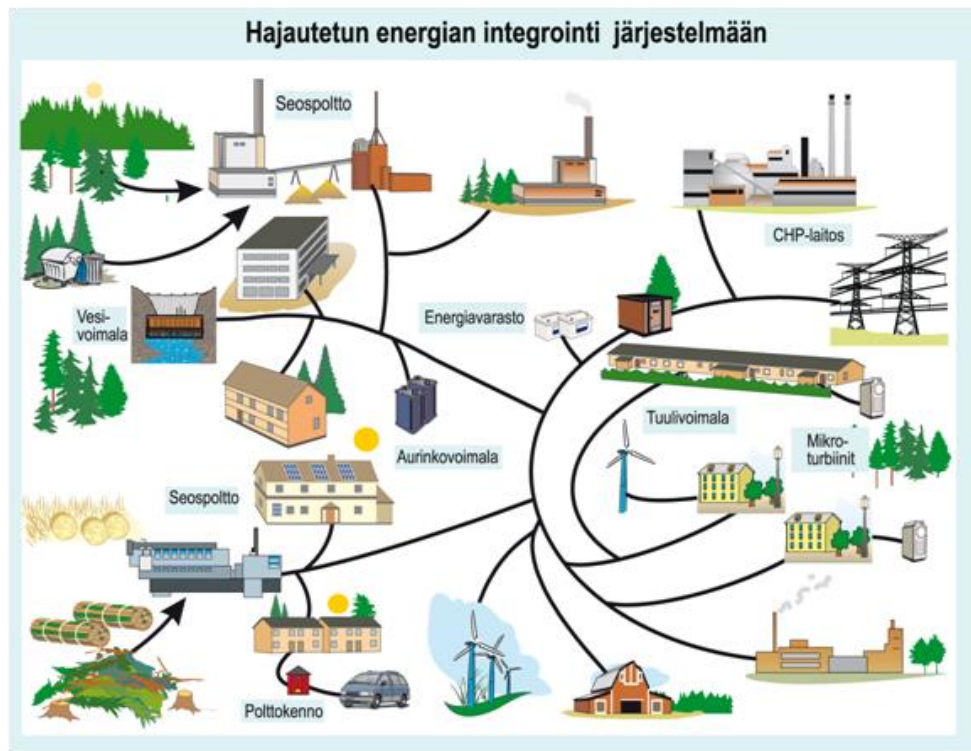
Raportin lopussa on katsaus lopulliseen prototyyppiin, sen ongelmiin ja mihin siitä tulisi tulevaisuudessa edetä. Laboriomalli kasattiin laborioinsinööri Matti Kohtalan avustuksella, sekä suunnittelussa avusti yliopettaja Aki Korpela.

## 2 HAJAUTETTU ENERGIANTUOTANTO YLEISESTI

### 2.1 Hajautetun energiantuotannon määritelmä

Hajautettu energiantuotannon kuvaukseen ei ole yksiselitteistä vastausta, sillä se käsittelee useita toisiinsa liittyviä konsepteja energian tuotantoon ja kulutukseen liittyen. Keskitetty tuotanto koostuu lähinnä ulkomailta tuotujen raaka-aineiden käyttöön energiantuotannossa, kuten hiiltä, uraania ja maakaasua. Keskitetystä tuotannosta saatu energia kattaakin suurimman osan Suomen energian käytöstä. Hajautettu energiantuotanto puolestaan käyttää paikallisia ja suurimmilta osin uusiutuvia luonnonvaroja energiantuotantoon, kuten aurinko-, tuuli- ja vesivoimaa. Hajautettu energiantuotanto eroaa myös tuotetun energian määrällä, sillä tuotanto määritellään keskitetyksi tuotetun tehon ylittäessä pientuotannon rajat. Nämä tehorajat ovat eroavat tuotantotavasta riippuen, ja niitä on käsitelty tarkemmin luvussa 2.2. Hajautettua sähköntuotantoa ohjataan yleensä paikallisesti ja sen tuotanto voidaan sijoittaa jakeluverkon yhteen tai useampaan liittymispisteeseen. Kuitenkin toistaiseksi Euroopassa ja Suomessa vain pieni osa hajautetusta tuotannosta kytketään suoraan jakeluverkkoon, mutta verkkoon kytkettyjen aurinkopaneelien määrä on kasvussa. (Vihanninjoki. 2015. s 31)

Hajautetulla tuotannolla tarkoitetaan yleensä paikallista sähkön pientuotantoa, joka myös pyritään käyttämään paikallisesti. Sillä pyritään hyödyntämään paikalliset resurssit ja niiden avulla saavuttamaan riippumattomuus muusta energianjakelusta mahdollisuuksien mukaan. Kuvassa 1 on esimerkki hajautetun tuotannon liittämisestä kulutukseen ja sen yhteydestä verkkoon. Suuri merkitys hajautetulla tuotannolla on sellaisilla alueilla, jotka ovat normaalin jakeluverkon alueen ulkopuolella tai sen rajoilla. (Vihanninjoki. 2015. s 2)



KUVA 1. Hajautetun energiantuotannon käyttö osana verkkoa. (kuva: Hirvonen R.)

Yksinkertaisesti hajautettua energiantuotantoa voidaan kuvata omaa tuotantoa sisältävällä asunnolla. Talo on liitettyä jakeluverkkoon, mutta asukas on päättänyt hyödyntää oman tonttinsa resurssit asentamalla katolleen aurinkopaneelit, sekä pihalleen pienen tuulivoimalan. Kun aurinko paistaa tai sää on tuulinen, näistä saatu energia hyödynnetään paikallisesti heti tai varastoimalla akkuihin. Energiantarpeen ylittäessä oman tuotannon varat saadaan energia normaalisti jakeluverkosta. Jos oma energiantuotanto ylittää paikallisen tarpeen, on mahdollista syöttää sähköä myös jakeluverkkoon päin, mutta tämä vaatii laitteistolta kykyä tahdistua jakeluverkkoon. Verkkoon tahdistus vaatii kuitenkin laitteistolta teknologiaa, joka lisää laitteiston hintaa. Myös energian säilömisessä suuremmalla mittakaavalla on omat, lähinnä taloudelliset haasteensa.

## 2.2 Hajautetun tuotannon energianlähteet

### 2.2.1 Aurinkoenergia

Hajautetun energiantuotannon ja pientuotannon kannalta aurinkoenergia on helpoiten määrältään kasvatettavissa oleva energiantuotantotapa. Tuulivoimaan verrattuna aurinkopaneelija voidaan asentaa lähes mille tahansa esteettömälle pinnalle, eikä se aiheuta melu, tai näköhaittaa muille. Aurinkoenergiaan liittyvän teknologian laskeva hinta ja



nouseva energiatehokkuus tekevät niistä jatkuvasti käytännöllisempiä ratkaisuja Suomen pohjoisissakin oloissa. Vuosittain säteilyenergian määrä Suomessa sijainnista riippuen on noin 790 – 980 kWh/m<sup>2</sup>, josta paneelilla voidaan muuntaa sähköenergiaksi noin 15 %. Aurinkovoima on kuitenkin Suomessa erittäin kausi- ja vuorokausiriippuvainen voimanvara. Sähkön ja lämmön tarve on suurimmillaan talvikuukausina, jolloin saadaan vähiten aurinkoenergiaa talteen, joten aurinkoenergia ei yksinään riitä. (Motiva. 15.11.2016. Auringonsäteilyn määrä Suomessa)

### **2.2.2 Pientuulivoima**

Tuulivoima jakautuu eri luokkiin käyttötavan ja laitetehton mukaan. Hajautetun tuotannon osaksi laskettavat pientuulivoimalat ovat nimellisteholtaan alle 50 kW:n turbiineita, joista suurimmat (5-50 kW) voimalat sijoittuvat yritysten tai maatalouksien käyttötarpeisiin. Alle 5 kW laitokset on puolestaan tarkoitettu taajama-asuntoihin ja liikerakennuksille, ja alle 1 kW laitokset lähinnä mökeille tai akkujen lataukseen. (Suomen tuulivoimayhdistys)

Aukeilla ja merenrannoilla yleisesti nähtävät suuret tuulivoimapuistot eivät ole pientuotantoa, vaan lukeutuvat suurvesivoiman tavoin keskitettyyn energiantuotantoon. Tämän työn verkkomallissa haluttiin kuitenkin tarkastella tuulivoimatuotannon liittymistä verkkoon sen nimellistehosta riippumatta, mallin kannalta oleellista on simuloida tuulivoimatuotannon vaikutusta verkkoon, mikä on käytännössä sama laitteiston koosta riippumatta.

### **2.2.3 Pienvesivoima**

Vesivoima jakautuu myös suur-, pien- ja minivesivoimaan, josta nimellisteholtaan yli 10 MW:n voimalat ovat suurvesivoimaa, joka lukeutuu keskitetyksi energiantuotannoksi. Alle 10 MW:n voimalat puolestaan voidaan luokitella hajautetuksi energiantuotannoksi. Vuonna 2009 pien- ja minivesivoimaloita oli yhteensä 150 kappaletta ympäri Suomea ja potentiaalia lisätä eri vesistöihin arvioitiin olevan 288 MW. Vesivoiman hyödyntäminen on kuitenkin kallista, joten taloudellisesti kannattavia kohteita on rajoitetusti. Tämän lisäksi vesivoimaloiden rakentamista vastustetaan usein vesistöihin ja ympäristöön vaikuttavista syistä. Vesivoiman merkitys säätövoimana on kuitenkin merkittävä, sillä vettä voidaan varastoida potentiaalivoimana. Energiaa voidaan siis käyttää

silloinkin, kun tuulivoimaa tai aurinkovoimaa ei ole saatavilla. (Motiva. 16.11.2016. Pienvesivoima)

#### **2.2.4 Hajautetut lämpölaitokset**

Suuri osa nykyisestä hajautetusta energiantuotannosta muodostuu eri polttoprosesseista. Lämpölaitoksista saadaan kuluttajille sekä lämpöä, että sähköä. Pienemmissä voima-loissa poltetaan tyypillisesti uusiutuvia ja bioperäisiä polttoaineita, joihin kuuluvat esimerkiksi puupolttoaineet, biokaasut ja turve. Edellä mainittujen energiantuotantomuotojen polttoprosessit eivät kuitenkaan ole täysin puhtaita, vaan aiheuttavat päästöjä ilmaan. Niiden etuna on kuitenkin luotettava energiantuotanto ympärivuorokautisesti, joten ne toimivat hyvin säätövoimana vesivoiman tapaan hajautetussa tuotannossa. (Suomen ympäristökeskus. 2007)

#### **2.3 Kysyntäjousto ja tehotasapaino**

Sähköntuotannon siirtyessä yhä enemmän uusiutuvien energiantuotantomuotojen hyödyntämiseen, vaikuttaa esimerkiksi aurinko- ja tuulivoiman lisääntyminen tuotantomäärien ajalliseen vaihteluun. Nämä tuotantomuodot tuottavat energiaa vain sään salliessa, joten ne eivät voi vastata kulutuksen vaihteluun, jolloin joko kulutusta tai tuotantoa voi olla liikaa.

Sähköverkossa tehotasapainon säilyvyys on tärkeää, sillä tuotannon ja kulutuksen epätasapaino näkyy verkossa jännitteen taajuuden vaihteluna. Koska tulevaisuudessa sääriippuvainen tuotanto kasvaa, tulee tehotasapainon säilyttäminen entistäkin tärkeämmäksi. Jos tuotanto ei voi vastata kulutuksen tarpeisiin, on kulutuksen vastattava tuotannon antiin. Tällöin on kuluttajan sähkönkäytön mukauduttava sähköntuotannon vaihteluihin.

Kysyntäjousto on siis tapa tasapainottaa sähkönkulutusta vaihtelevan tuotannon suhteen. Sähköä pyritään käyttämään ajankohdasta riippumatta, jos sitä on tarjolla. Esimerkiksi akkujen varaus tai käyttöveden lämmitys suoritetaan sähköntuotannon ollessa korkeimmillaan. Kysyntäjousto on yksinkertaisesti sähkönkäytön älykästä ajoittamista. (Heinimäki, R.)

### 3 LABORATORIOMALLIN SUUNNITTELU

Suunnittelun alkuvaiheessa laboratoriomallille määriteltiin tarpeelliset ominaisuudet, jotka mallin tulisi jollain tavalla toiminnassaan havainnollistaa. Koska mallin tarkoitus on toimia tulevaisuudessa osana Tampereen ammattikorkeakoulun sähkövoimatekniikan laboratorion mittaustöitä, täytyy sen olla selkeästi hahmoteltavissa ja sisältää tutkitun aiheen kannalta havainnollistavia mittauksia. Koska aihe on itsessään laaja ja osittaan monimutkainen, rajattiin tämän opinnäytetyön osuus yksinkertaisen prototyypin rakentamiseen, jonka päälle voidaan tulevaisuudessa laajentaa.

#### 3.1 Mallin osat ja halutut ominaisuudet

Laboratoriotyöllä pyritään kuvaamaan esimerkiksi pientä kylää tai kulutusta sisältävää aluetta, jolla on yhteys jakeluverkkoon, sekä sisältää paikallista hajautetun energian tuotantoa. Toteutettaviin osiin kuuluu liittymä jakeluverkkoon, paikallisen kulutuksen aiheuttama kuorma, paikallisen hajautetun tuotannon energialähteet, sekä mahdolliset verkon ongelmatilat. Mallin jännitetason päätettiin olevan pääjännitteeltään 400 voltia, sillä se mahdollisti TAMKin sähkövoimatekniikan laboratorion olemassa olevien laitteiden hyödyntämisen ja teki suunnitelmasta yksinkertaisemman. Mallin teho puolestaan haluttiin rajata muutamaankilowattiin, jotta piirissä ei kulje kahta ampeeria suurempia virtoja.

##### 3.1.1 Verkko ja perusvoima

Malliin haluttiin niin sanottu kantaverkko, joka vastaa mallissa oikeaa sähköjakeluverkkoa. Tämä verkko antaa mallin kuormalle noin 400 V 50 Hz vaihtojännitteen. Verkko on liittymäpisteen takana, joka mahdollistaa sen irrottamisen kuormasta ja paikallisesta energiantuotannosta.

Verkolta haluttiin myös nähdä ylikuormalla verkon taajuuden ja jännitteen lasku. Verkon taajuus laskee, kun kulutusta on liian paljon tuotantoon verrattuna. Fingridin mukaan sähköverkossa kysyntä ja tuotto täytyy olla aina tasapainossa parhaan sähkönladun varmistamiseksi, sekä verkon taajuuden pysyttävä 49,9 ja 50,1 hertsin välillä (Se-

derlund, L. 2008). Tämän ilmiön tarkastelu ja demonstrointi ovat oleellinen osa laboratoriotyötä.

### **3.1.2 Hajautettu tuotanto**

Hajautettua tuotantoa mallissa edustaa tuulivoima ja aurinkosähkö. Koska molempien energiantuotantotapojen tuottavuus riippuu merkittävästi sääolosuhteista, haluttiin niiden tuottaman virran olevan säädeltävissä. Hajautetun tuotannon tarkoitus on auttaa jakeluverkkoa syöttämään tarvittava teho kuormalle ja mahdollisesti tuottaa koko kuorman vaatima teho jakeluverkon ollessa irti kuormasta. Teoriassa on myös mahdollista, että hajautettu tuotanto tuottaa enemmän energiaa, mitä kuorma tarvitsee, mikä näkyy verkon taajuuden nousuna. Tämän havainnollistaminen kuuluu myös lopullisen mallin ominaisuuksiin.

Mallissa voidaan myös pyrkiä havainnollistamaan aurinko- ja tuulivoiman eroavaisuuksia sekä rakenteessa, että tavassa tuottaa energiaa. Esimerkiksi aurinkopaneelit tuottavat tasasähköä, joka pitää muuttaa ennen verkkoon syöttöä vaihtosähköksi vaihtosuuntaajan, eli invertterin avulla, kun taas tuulivoimaturbiinit tuottavat suoraan vaihtosähköä.

Koska edellä mainittujen tuotantomuotojen tuotantoteho on vaihtelevaa, haluttiin myös jonkinlainen säätövoima, joka voidaan tarvittaessa kytkeä muun tuotannon rinnalle kulutuksen vaatiessa. Jakeluverkko ajaa pääosin tämän tehtävän, mutta jos kuormaa syötetään vain paikallisesti, tarvitaan esimerkiksi padottua vesivoimaa tai lämpövoimala takaamaan sähkön saannin.

### **3.1.3 Verkon kuorma**

Malli tarvitsee myös kuorman kuvaamaan asuinalueen tai teollisuuden kulutusta. Yksinkertaisen kolmivaiheisen vastuskuorman arvioitiin riittävän, vaikka käytännössä jakeluverkon kuormana on usein jonkin verran myös loistehoa vaativaa kuormaa. Normaalin tasaisen kuorman lisäksi haluttiin myös mahdollisuus säätää kuorman suuruutta, jotta kulutuksen vaihtelun vaikutukset voitaisiin havaita. Tällä saadaan myös aikaan luvussa 3.1.1 mainittu verkon ylikuormitustilanne.

Kulutuksen säätäminen on myös oleellista luvussa 2.3 mainitun kysyntäjoustop havainnollistamisessa. Mallissa aurinko- ja tuulivoimalla tuotettu energia vaihtelee, joten kulutuksen määrää tulisi säätää sen mukaan verkon tehotasapainon säilyttämiseksi.

#### **3.1.4 Laboratoriotyöhön sisältyviä mittauksia**

Oleellista laboratoriomallille on mahdollisuus mitata keskeisiä arvoja laboratoriotyön kannalta, jotka havainnollistaisivat eri osien toimintaa. Näihin kuuluvat esimerkiksi sähkönlaadun tarkkailu, sekä jännitteiden ja virtojen mittaus. Mallin eri osiin tulisi siis päästä helposti käsiksi mittauslaitteilla.

### **3.2 Alkuperäinen visio valmiista mallista**

Edellisessä luvussa mainittujen osien lisäksi lopullisen mallin haluttiin alun perin olevan täysin automatisoitu ja ohjattavissa tietokoneohjelman avulla. Mallin eri osien arvojen seuranta ja säätely suoritettaisiin niin sanotusti etänä tietoverkon välityksellä. Mallille tehty ohjelma laatisi esimerkiksi tuulelle ja auringonpaisteelle omat muuttuvat profiilinsa, jotka vaikuttaisivat vastaavasti tuuli- ja aurinkovoimaa simuloivan mallin virran ulostuloon. Sillä voisi myös seurata sähkönlaatua reaaliajassa ja tutkia kuorman ja energiantuotannon määrän vaikutusta verkon taajuuteen. Tavoitteena oli, että mallin tietoteknistä puolesta muodostuisi erillinen opinnäytetyö, ja fyysisen sähkötekniikan osan suunnitteleminen ja toteuttaminen ovat osa tätä opinnäytetyötä.

Automatisoitu malli vaatii laitteilta mahdollisuutta kommunikoida ja vastaanottaa käskyjä tietokoneella ajetusta ohjelmasta. Tämä vaatii esimerkiksi taajuusmuuttajilta tai teholähteiltä kommunikaatioprotokollaa, jota ohjelmisto osaa tulkita. Ohjelmiston tuottamisen helpottamiseksi eri osien olisi hyvä käyttää samaa protokollaa, jotta ohjelmiston ei tarvitse tulkita useita eri tietomuotoja.

Lopulliseen malliin mietittiin myös moduulista periaatetta. Jos laitteiden koko sallii, voisi mallin eri osat olla omina kokonaisuuksinaan, jotka voidaan liittää erikseen mallin runkoon. Tämä helpottaisi mallin siirtämistä ja tekisi siitä mahdollisesti kannettavan.

### 3.3 Lopullinen suunnitelma prototyypille

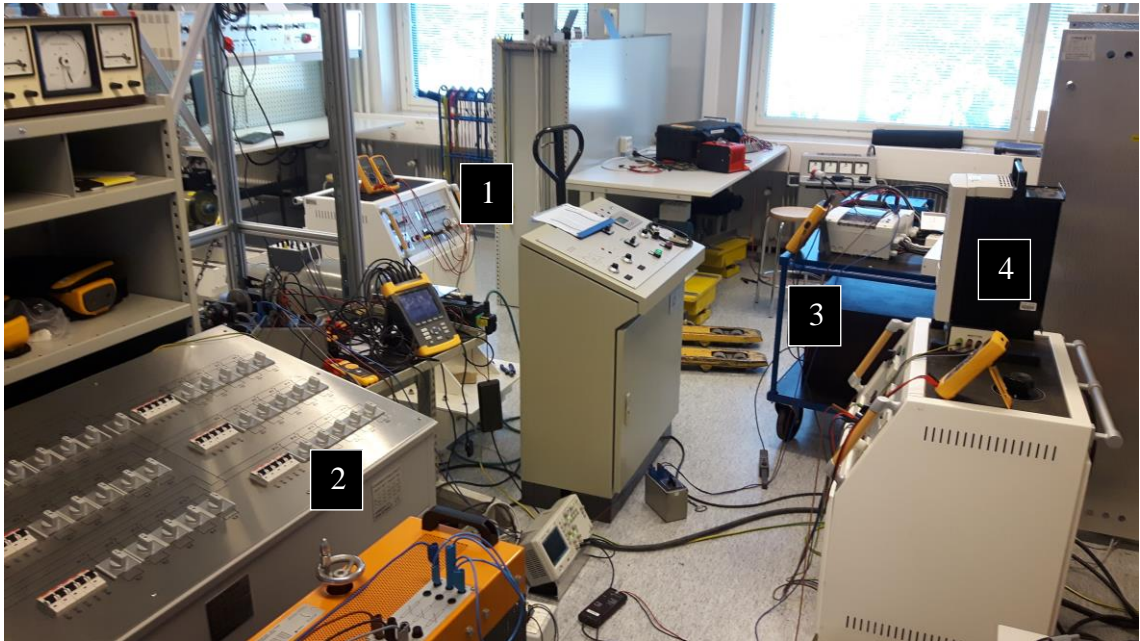
Mallista tehtiin alustava suunnitelma, johon pyrittiin löytämään ja hankkimaan tarvittavat osat sopivaan hintaan. Komponenttien löytyminen osoittautui kuitenkin hankalaksi, sillä suurimmalla osalla sopivista komponenteista ei ollut haluttuja etäohjausominaisuuksia. Esimerkiksi tuuli- ja aurinkovoima suunniteltiin alun perin toteutettavaksi tasasähköteholähteellä, jonka virran ulostuloa voitaisiin säätää etäältä kommunikaatioprotokollan avulla. Tämä tasasähkö puolestaan muunnettaisiin vaihtosähköksi vaihtosuuntaajan avulla, jonka jälkeen vaihtosuunnattu sähkö muunnettaisiin kolmivaiheiseksi sopivaan jännitetasoon. Hinnaltaan ja toimivuudeltaan sopivan teholähteen löytyminen ei kuitenkaan onnistunut. Lopulta automatisoitu osuus todettiin liian laajaksi ja työssä päädyttiin luomaan mahdollisimman yksinkertainen malli. Etäohjattavasta konseptista luovuttiin toistaiseksi, ja automatisointi olisi osa projektia tulevaisuudessa.

Koska lukuisat laitehankintoihin liittyvät vastoinkäymiset muuttivat mallin suunnitelmia ja piirustuksia jatkuvasti, päätettiin aloittaa mallin rakennus osa kerrallaan ja pohtia niiden yhdistämistä myöhemmin. Uusien osien hankkimisen sijasta päädyttiin toteuttamaan mallin eri osat TAMKIn sähkövoimatekniikan laboratoriosta löytyvillä komponenteilla ja laitteilla. Niillä saatiin rakennettua prototyyppi, josta nähdään suunniteltujen ratkaisujen toimivuus käytännössä ilman suuria investointeja.

Mallin sähköpiirustus suoritettiin poikkeavasti jälkikäteen aina uusien toimivien ratkaisujen löytyessä. Liitteessä 1 on esitetty lopullisen prototyypin piirros, josta näkyy laitteiston johdotus ja käytetyt laitteet. Piirrokseseen ei ole merkittynä mittalaitteita. Piirroksessa S1, S2 ja S3 ovat kytkimiä, joilla mallin eri osat erotettiin toisistaan.

## 4 LABORATORIOMALLIN RAKENNUS

Mallin rakentaminen toteutettiin Tampereen ammattikorkeakoulun sähkövoimatekniikan laboratoriossa, hyödyntäen laboratoriotöissä yleisesti käytettyjä johtokomponentteja ja mittauslaitteita. Luvussa käydään läpi aihekohtaisesti eri osien kokoaminen ja niihin liittyvät huomiot. Kuvassa 2 on esillä mallin eri osiot numeroituina.

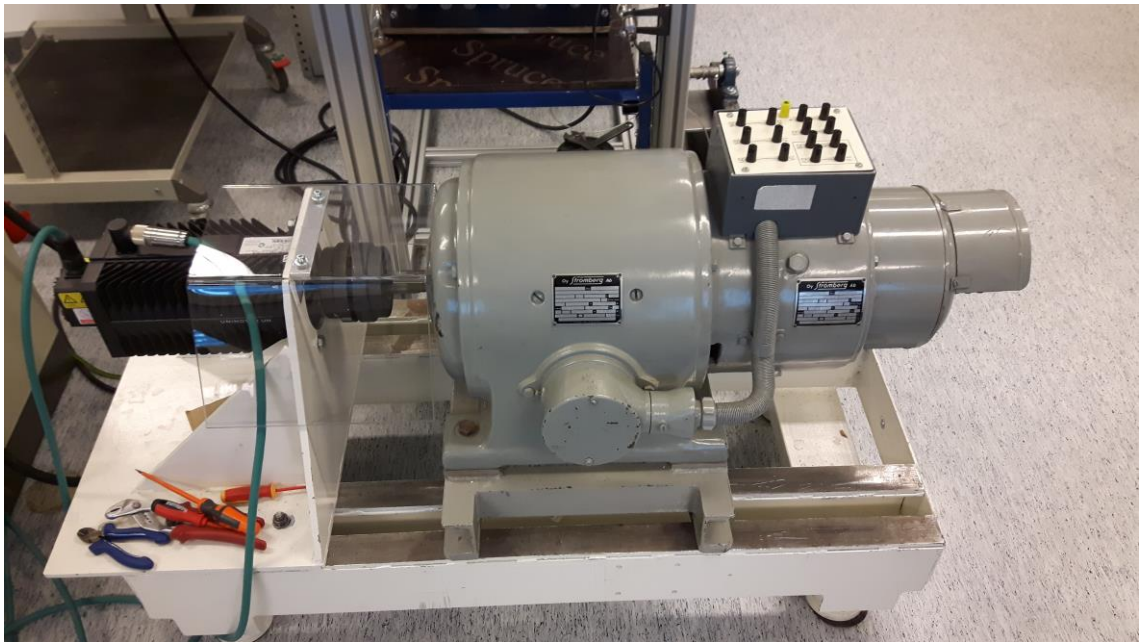


KUVA 2. Laboratoriomallin komponentit.

Numero 1 on servomootorilla pyöritetty luvussa 3.1.1 mainittu perusvoimaa simuloiva tahtikone, numero 2 on verkon kuormana toimivan vastusvaunun ja säätövastuksen yhdistelmä, numero 3 on aurinkosähköinverterin ja akuston yhdistelmä, ja numero 4 on taajuusmuuttajalla ja virtavaunulla toteutettu tuulivoima.

### 4.1 Jakeluverkko ja verkon kuorma

Laboratoriomallin kokoonpano aloitettiin jakeluverkosta ja siihen liitettävästä kuormasta. Jakeluverkon toteutuksessa oli tärkeää saada verkosta helposti hallittava, sekä mahdollisuus saada sen taajuus ja jännite laskemaan ylikuormitustilanteessa. Verkon toteuttamiseen päätettiin käyttää servomootorilla pyöritettyä tahtikonetta, sillä servomootorin pyörimisnopeutta muuttamalla pystytään vaikuttamaan tahtikoneen tuottaman sähkön taajuuteen. Tahtikoneen rakenne näkyy kuvassa 3.



KUVA 3. Servomootoriin kiinnitetty tahtikone.

Tahtikoneen päällä oleva kytkentärasia sisältää liitännät tahtikoneen roottorin ja staattorin napoihin. Mustaa servomootoria ohjataan ulkoisesta keskukselta. Tahtimootorin ja magnetointikoneen kilpiarvot ovat lueteltu erikseen, ja ne on dokumentoitu taulukkoon 1. Tahtikoneesta ja sen magnetoinnista selitetään tarkemmin luvussa 4.1.1.

TAULUKKO 1. Tahti- ja magnetointikoneen kilpiarvot.

	Tahtikone	Magnetointikone
Teho	2 kVA	0,1 kW
Taajuus	50 Hz	-
Jännite	400/231 V	25 V
Virta	2,9 A	4,5 A
Cos $\phi$	0,8	-
r/m	1500	-

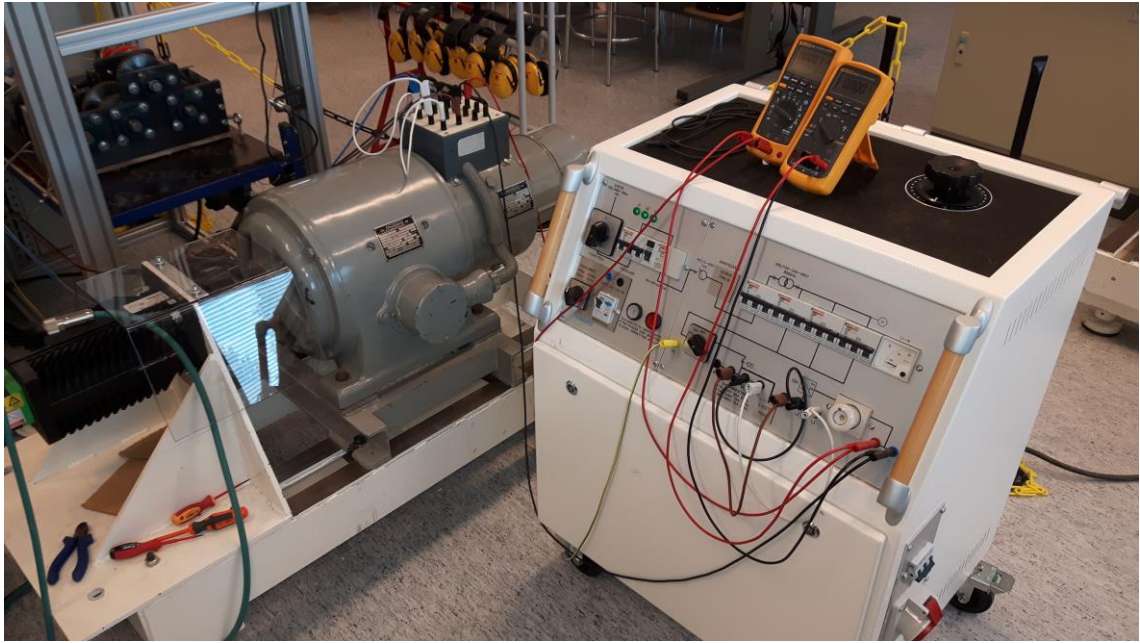
#### 4.1.1 Tahtikoneen asennus ja toimintaperiaate

Verkon generaattorina käytettiin 2 kVA:n tahtikonetta. Tahtikone koostuu pyörivästä roottorista, sekä sen ympärillä olevasta kiinteästä staattorista. Koska tahtikone toimii tässä käytössä generaattorina, tahtikoneen roottoria pyöritetään ulkoisen servomootorin avulla. Roottorissa puolestaan on vierasmagnetoitu napakäämitys, joka magnetoidaan syöttämällä sille tasavirtaa, mikä luo roottorille muuttumattoman magneettikentän. Magnetoituna ja pyöriessään roottori luo staattorin sisälle pyörivän magneettikentän,



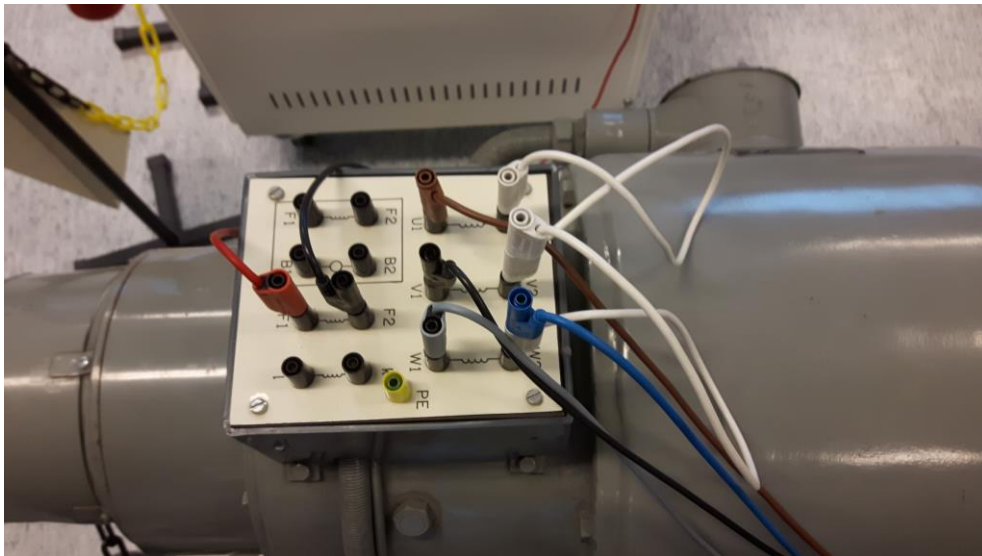
joka puolestaan indusoi staattoriin virran, ja mahdollistaa tahtikoneen toimimisen generaattorina. (Hietalahti. 2013. s 46)

Roottorin magnetointi tehdään ulkoisesti sen napoihin syötetyn tasasähkön avulla. Kuvassa 4 on tasasähkön tuottoon käytetty virtavaunu.



KUVA 4. Tahtikoneen magnetoinnin suorittava virtavaunu ja tahtikone.

Vaunun avulla roottoriin syötettävän tasasähkön jännitettä voidaan säätää portaattomasti. Tämä on tärkeää, sillä syötetyn tasavirran ja -jännitteen suuruus määräävät tahtikoneen verkkoon syöttämän jännitteen suuruuden. Näin saadaan mahdollisimman tarkasti haluttu 230 V jännite 50 Hz taajuudella. Taulukosta 1 nähdään, että magnetointikoneen nimellisjännite on 25 V ja nimellisvirta 4,5 A. Roottorin pyöriessä 1500 kierrosta minuutissa, tahtikone syöttää verkkoon magnetoinnin nimellisarvoilla 400 V pääjännitteen. Kuvassa 5 on havainnollistettu tahtikoneen napojen kytkentä.

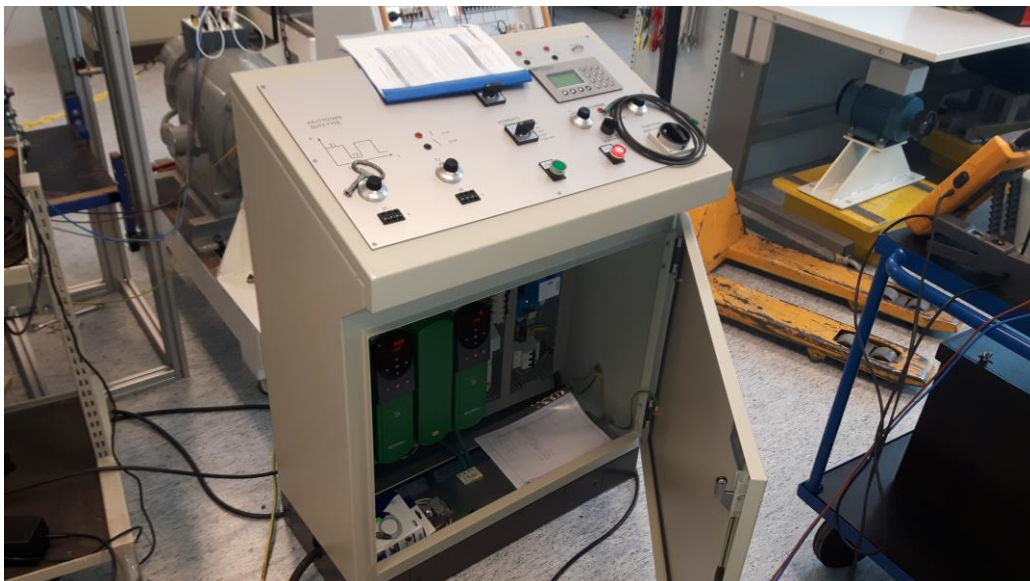


KUVA 5. Kytentärasian johdotus.

Kuvassa virtavaunulta saatu tasajännite ohjataan roottorin positiiviseen (F1) ja negatiiviseen (F2) napaan. Staattorin liittimet U1, V1 ja W1 yhdistetään mallin verkkoon. Nämä vastaavat verkon kolmea vaihetta. Staattorin toisen pään liittimet U2, V2 ja W2 kytetään tähteen. Tästä tähtipisteestä liittyy mallin verkkoon myös nollajohdin. Tahtikone yhdistetään myös verkon maadoitukseen turvallisuuden takaamiseksi.

#### 4.1.2 Servomootorin ohjaus ja parametrit

Tahtikoneen roottoria pyörittävää servomootoria ohjataan kuvassa 6 olevasta ohjauspöydästä.



KUVA 6. Servomootorin ohjauspöytä.

Tällä voidaan ohjata tarkasti servomoottorin pyörintänopeutta, tai sen antamaa momenttia. Itse moottorin toiminnan määrää pöydän sisällä oleva taajuusmuuttaja. Jotta servomoottorin toiminta sopisi tarvittuun käyttöön, täytyy taajuusmuuttajan parametreihin tehdä taulukossa 2 näkyvät muutokset:

TAULUKKO 2. Taajuusmuuttajan tarvitsemat parametrit.

Parametri	Arvo	Selitys
0.00	149	Parametrilukon avaus
0.46	11.25	Servomoottorin nimellisvirta (A)
4.05	50.0	Moottorin ylivirta nimellisvirran suhteen (%)
4.15	400	Ylivirran kesto ennen pysäytystä (s)
4.19	-	Näyttää ylivirtatilanteen kertymän

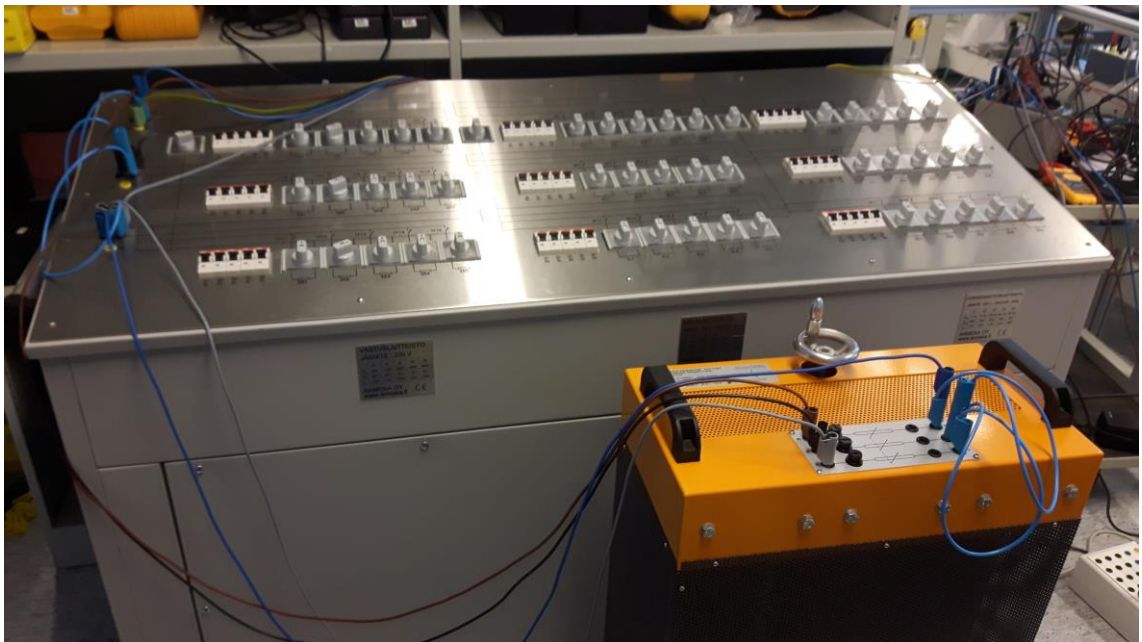
Kaapin sisällä on kaksi taajuusmuuttajaa, joista oikeanpuolimmaisesta suoritetaan parametrien muutokset. Jotta parametreja voi muuttaa, täytyy parametrilukko avata. Tämä onnistuu sijoittamalla parametriin 0.00 arvon 149. Tämän jälkeen samaan parametriin annetaan parametrilukolle asetettu numerokoodi, jonka jälkeen parametrien muuttaminen onnistuu. Koska moottorin pyörimisnopeus, eli verkon taajuus, laskee liian suurella kuormalla, halutaan taajuusmuuttajan luulevan ylikuorman tapahtuvan sopivan pienellä virralla. Tällöin mallin verkon virrat eivät kasva liian suuriksi. Ylivirtaparametrin 4.05 arvon 50.0 havaittiin sopivan hyvin haluttuun tarkoitukseen. Tätä arvoa voi kuitenkin muuttaa, jos halutaan saada verkko kestävämpään paremmin suurempaa kuormaa.

On kuitenkin huomioitava, että taajuusmuuttaja luulee moottorin lämpenevän ylivirtatilanteessa, vaikka virrat olisivat alle nimellisen virran. Tätä turvatoimea ei voi kokonaan poistaa, mutta parametrilla 4.15 voidaan vaikuttaa virran katkaisun ajoitukseen. Suurimmillaan tämä arvo voi olla 400 sekuntia, jonka jälkeen taajuusmuuttaja pysäyttää servomoottorin. Tämän antaa tarpeeksi aikaa verkon ylikuormatilanteen koestukseen ja tarkkailuun. Parametri 4.19 kuvaa ylivirtatilanteen kehitystä. Ylivirtatilanteessa tämä arvo jatkaa nousua 100:aan parametrissa 4.15 määritetyn ajan kuluessa ja palaa nolliin, kun ylivirtatila loppuu.

Taajuusmuuttaja on aseteltu niin, että virrat pois kytkettäessä parametrit palaavat muuttamattomaan tilaan, joten parametrit pitää asettaa uudelleen käynnistyksen jälkeen. Tämän voi muuttaa, mutta näin servoa voidaan käyttää myös sen alkuperäiseen tarkoitukseen, sillä servoa käytetään myös muihin sähkövoimatekniikan laboratorion töihin.

### 4.1.3 Kuorma

Verkon kuormaksi valittiin 400 voltille sopiva kolmivaiheinen vastusvaunu. Sen avulla jokaiselle vaiheelle saadaan aikaan symmetrinen tai epäsymmetrinen kuorma. Vaunusta löytyy myös käämitykset ja kondensaattorit induktanssin ja kapasitanssin luomiseksi, jos on tarvetta loistehoa sisältävälle kuormalle. Tämän lisäksi vastusvaunun rinnalle kytkettiin säätövastus, jolla voidaan säätää verkon kuormaa portaattomasti. Vastusvaunu ja säätövastus ovat esitettynä kuvassa 7.



KUVA 7. Verkon kuorma toteutettuna vastusvaunulla ja säätövastuksella.

Säätövastuksen avulla nähdään helposti, milloin verkon kuorma tulee liian suureksi syötettyyn tehoon nähden. Kuorma kytkettiin tähden ja tähtipiste yhdistettiin verkon nol-lajohtoon. Taulukossa 3 on kirjattu ylös vastusvaunun eri vastuksien arvot.

TAULUKKO 3. Vastusvaunun kilpiarvot.

	R1	R2	R3	R4	R5
$P_N$	55 W	110 W	220 W	440 W	880 W
$R_N$	960 $\Omega$	480 $\Omega$	240 $\Omega$	120 $\Omega$	60 $\Omega$
$I_N$	0,24 A	0,48 A	0,96 A	1,92 A	3,83 A



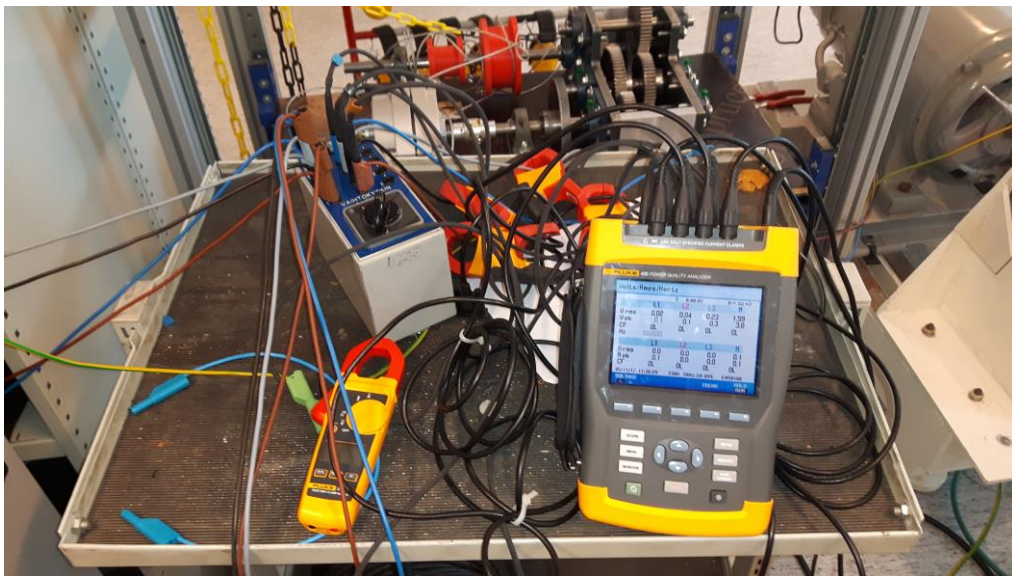
Nämä vastukset voidaan kytkeä toistensa rinnalle eri yhdistelmissä. Koska vastukset ovat rinnan, voidaan kokonaisvastusarvo  $R_{tot}$  laskea kaavalla

$$R_{tot} = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right)^{-1} \quad (1)$$

jossa  $R_1$ ,  $R_2$  ja  $R_n$  ovat rinnankytkettyjen vastuksien arvoja.

Vastuksien vaatimat virrat ja tehot saadaan laskettua taulukossa 3 esitettyjen arvojen summana. Esimerkiksi vastuksien R2 ja R3 ollessa kytkettyinä, vaatii 1 vaihe noin 1.44 A virtaa ja kuluttaa 330 W tehoa.

Kuorma on yhdistetty generaattorin toteuttamaan verkkoon yksinkertaisesti kytkimellä, joka näkyy kuvassa 8. Tähän pisteeseen lisätään myös muu tuotettu sähkö. Kytkimellä kuorman ja muun tuotannon saa kytkettyä irti verkosta. Generaattorin tuottaman verkon sähkönlaatua seurataan myös Fluke 43B -mittarilla.



KUVA 8. Verkon kuormasta erottava kytkin.

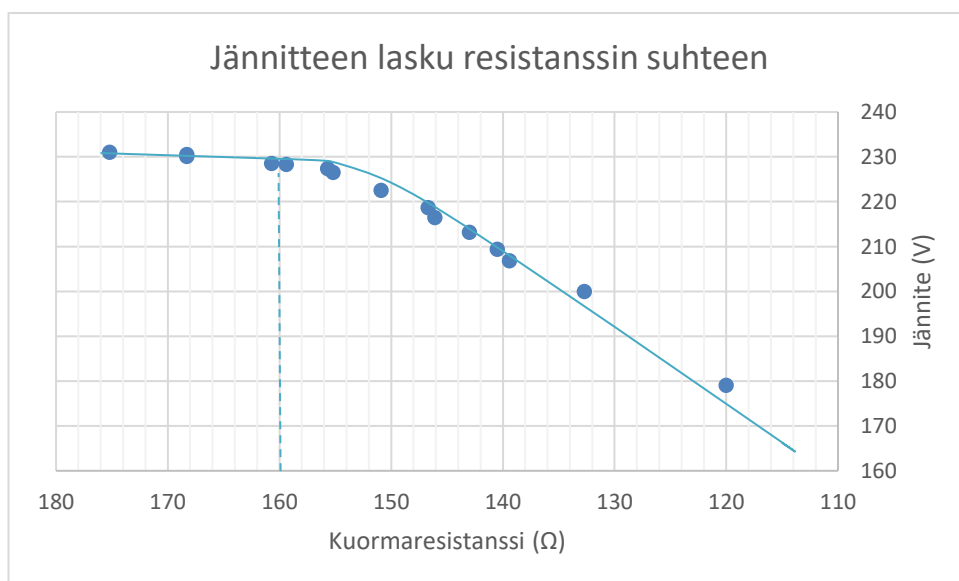
#### 4.1.4 Verkon ylikuormatilanteen toteutus

Taulukon 2 parametreilla servo siis jarruttaa moottorin pyörimisnopeutta, jos kuorma on tarpeeksi suuri. Tahtikoneen ylikuormatilaan tarvittava vastus määriteltiin tarkasti säätövastuksen avulla. Vastusvaunusta vastus R2 pidettiin kytkettynä kaikissa vaiheissa

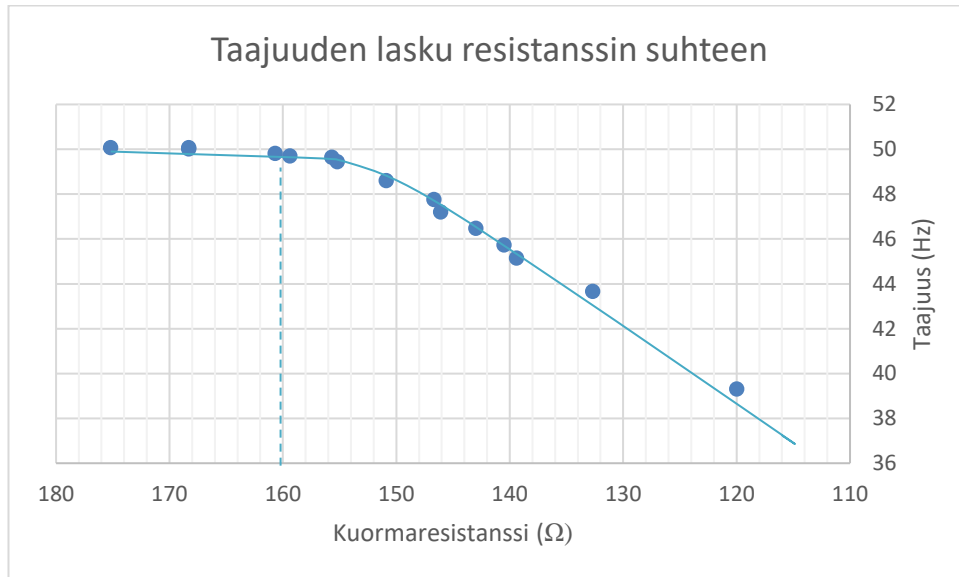
jatkuvasti kiinteänä kuormana, josta verkkoon näkyvä kuorma yhdelle vaiheelle on noin  $480 \Omega$  taulukon 3 mukaan. Tämän jälkeen verkon kuormaa alettiin lisätä hitaasti, kunnes verkon taajuuden havaittiin laskevan. Kuormaa lisätään pienentämällä säätövastuksen resistanssia, sillä resistanssin pienentyessä virta kasvaa. Virran kasvu puolestaan kasvattaa tehoa, mikä kuvaa verkolle suurempaa kuormaa. Säätövastuksen vastusarvoa ei voi mitata jännitteisenä, joten ylikuormituspuheen löytyessä kuorma kytkettiin irti verkosta mittauksen ajaksi.

Tarkan ylikuormituspuheen löytämiseksi otettiin useita mittauspisteitä eri vastusarvoilla ja seurattiin jännitteen, sekä taajuuden käyttäytymistä resistanssin pienetessä. Suurimmillaan säätövastuksen resistanssi oli  $276,6 \Omega$ , jolloin kaavan 1 mukaan kuorman kokonaisresistanssi on  $175,2 \Omega$ . Tämän kuorman generaattorin toteuttama verkko pystyy ylläpitämään ongelmitta, eli verkon jännite on noin  $230 \text{ V}$  ja taajuus noin  $50 \text{ Hz}$ . Säätövastuksen resistanssia alettiin pienentää, seuraamalla jatkuvasti verkon taajuuden ja jännitteen arvoja. Verkon virta pysyi noin  $1,4$ :ssä ampeerissa mittauksen ajan, sillä servo-moottori rajoitti virran määrää pyörimisnopeutta laskemalla.

Mitatuista arvoista muodostettiin kuviot 1 ja 2, joista näkyy jännitteen ja taajuuden käyttäytyminen resistanssin pienetessä. Mittaustulokset ovat itsessään taltioitu liitteeseen 2. Kokonaisresistanssi mitattiin aina mittauspisteiden välissä Fluke 87 - yleismittarilla.



KUVIO 1. Jännitteen lasku resistanssin pienentyessä



KUVIO 2. Taajuuden lasku resistanssin pienentyessä

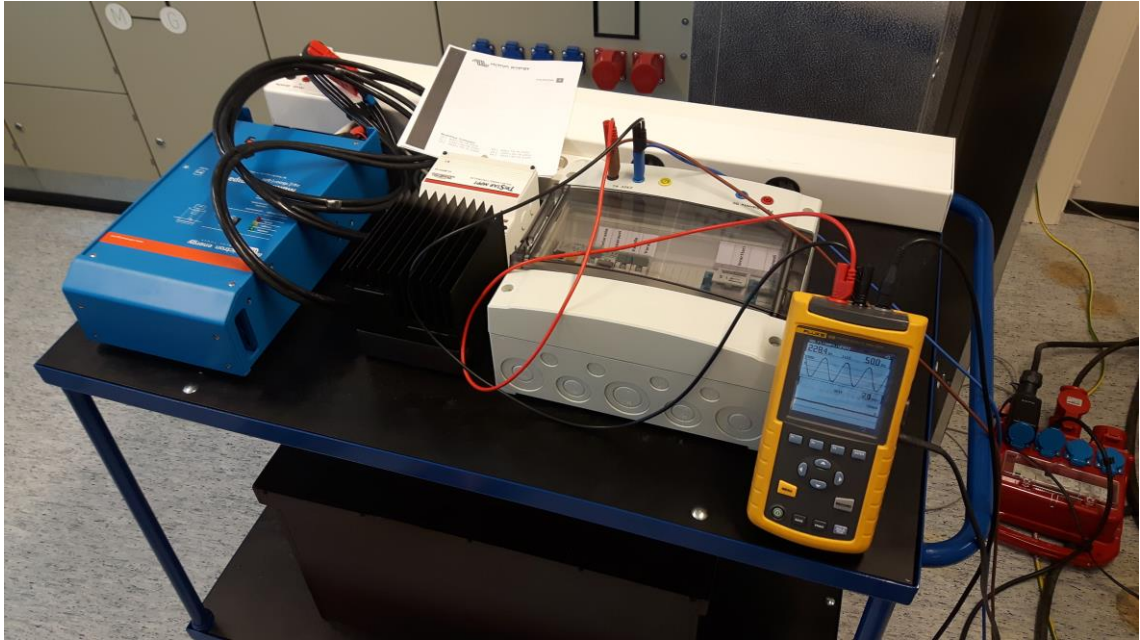
Kuten kuvioista nähdään, sekä jännitteen taajuus että tehollisarvo laskevat lineaarisesti ylikuormatilan alkaessa. Taulukon 2 parametreilla ylikuorma alkaa laskea taajuutta ja jännitettä noin 160 ohmia pienemmillä vastusarvoilla.

Mittauksessa käytettyjen johtojen resistanssin mitattiin olevan  $0,3 \Omega$ , mutta se luokiteltiin merkityksettömäksi, sillä täysin tarkkaa arvoa ylikuorman aiheuttavalle resistanssille ei saa. Mittauksessa käytetyt resistanssit ovat vaihekohtaisia, mutta verkon kuorma oli jatkuvasti symmetrinen, eli joka vaiheella oli sama kuorma. Servomootoria ohjaavan taajuusmuuttajan ylivirran parametria muuttamalla voidaan myös halutessa vaikuttaa ylikuormatilan tarvitseman virran suuruuteen, jos ylikuormatila halutaan toteuttaa suuremmilla tehoilla.

## 4.2 Aurinkovoiman toteutus

Aurinkovoima haluttiin alun perin toteuttaa teholähteen avulla, jotta sen syöttämää virtaa voisi helposti säätää. Kun päädyttiin käyttämään koululta löytyviä laitteita, käyttötarkoitukseen sopivan tehokasta lähdettä ei löytynyt. Koska löytyneet teholähteet antoivat vain muutamia ampeereja virtaa 12 voltilla, jäisi virta mallin kannalta merkityksettömän pieneksi muunnettaessa se verkkoon sopivaksi 230 V vaihtosähköksi.

TAMKin Greenlabin laitteistoista löytyi kuitenkin aurinkopaneelille tarkoitettu akusto ja invertteri, jotka näkyvät kuvassa 9.



KUVA 9. Vaunu, joka sisältää akuston ja aurinkosähkölle soveltuvan invertterin.

Tämän ratkaisun ongelmana on, että sen ulostulon virtaa ei voi rajoittaa, joten se pystyy kantamaan vastuskuorman yksinään. Kuitenkin sen avulla pystyimme kokeilemaan jakeluverkkoon yhdistymistä.

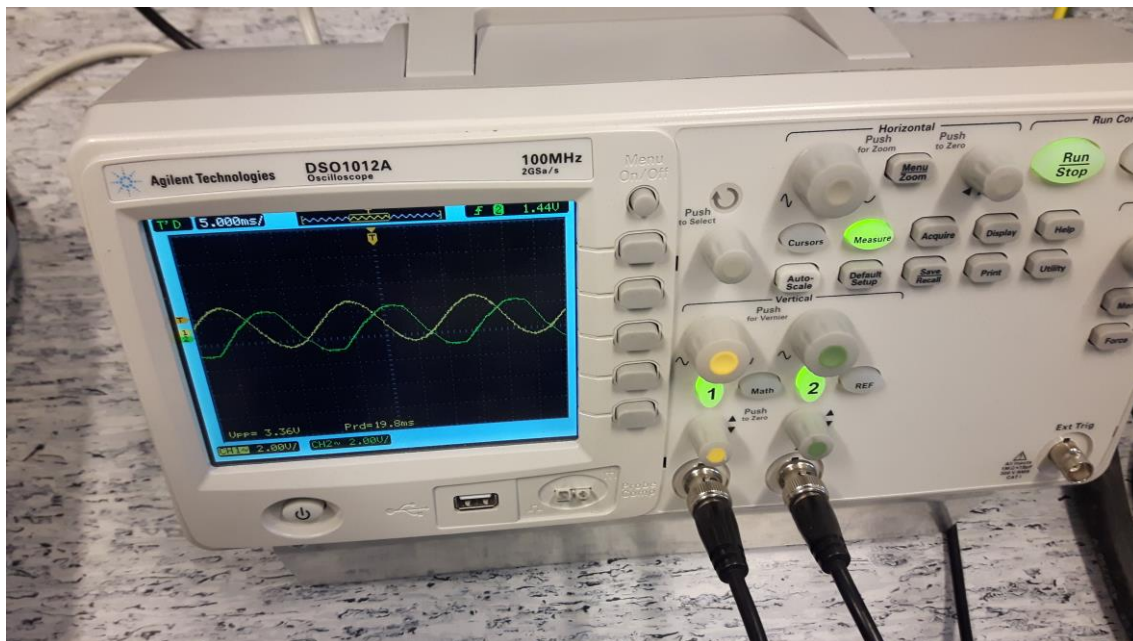
#### 4.2.1 Tahdistus verkkoon

Kaikki tuotettu sähkö täytyy tahdistaa oikein verkkoon, jos verkkoon päin energiaa halutaan syöttää. Tahdistus suoritetaan nykyään automatiikan avulla, mutta tahdistus onnistuu myös manuaalisesti. Jotta tahdistus voidaan suorittaa, on tuotetun jännitteen taajuuden, tehollisarvon, vaihejärjestyksen ja vaihekulman oltava sama verkkosähkön kanssa. (Hietalahti, L. 2013. s 53)

Jos tahdistusta ei tehdä oikein, generaattorille syntyvä virtapiikki aiheutti taajuuden jyrkän laskun. Tämä aiheutti myös ylivirtatilan aurinkosähkön invertteriin, joka katkaisi virran syötön. Koska kyseinen invertteri ei kykene automaattisesti tahdistamaan itseään luotuun verkkoon, oletettiin sen taajuuden pysyvän koko ajan samana. Tällöin olisi tärkeää saada verkkoa syöttävän generaattorin taajuus ja vaihekulma mahdollisimman tar-



kasti samaksi aurinkosähköinverterin kanssa manuaalisesti mittaamalla. Tätä havainnollistaa kuva 10.



KUVA 10. Generaattorin ja aurinkosähkön jännitteen vertailu.

Tahdistus täytyi suorittaa tasan sillä hetkellä, kun generaattorin ja aurinkosähkön invertterin tuottamat jännitteet olisivat oskilloskoopissa synkronisoitu. Tämä tarkoittaa kuvan 10 tapauksessa sitä, että jännitteiden siniaallot ovat päällekkäin. Tahdistus suoritetaan yksinkertaisesti aurinkosähkön verkosta erottavan kytkimen avulla. Taajuuksien on kuitenkin oltava hyvin lähellä toisiaan, sillä muuten tahdistus ei välttämättä pidä. Ilman automaattista tahdistusta, toimenpide voi manuaalisesti vaatia monta yritystä onnistuakseen.

Lopulta tahdistus kuitenkin onnistui, joten tämä ratkaisu aurinkosähkölle toimii myös periaatteessa. Kun aurinkosähkö yhdistettiin generaattorin toteuttaman verkon rinnalle, ylikuormatilannetta ei syntynyt kuormaa lisätessä. Taajuus ja jännite ei siis käyttäytynyt kuvioiden 1 ja 2 tapaan, vaan verkossa pysyi 230 V 50 Hz jännite resistanssin laskiessa alle 160 ohmin. Aurinkosähkön tuottamaa virtaa pitäisi kuitenkin olla mahdollista säätää, sillä nyt aurinkosähkö antaa käytännössä loputtoman määrän energiaa mallin kannalta. Tämä ei siis voi ottaa huomioon sään vaihtelevuutta, eikä ylikuormatilannetta voi mallin kannalta tapahtua.

### 4.3 Tuulivoiman toteutus

Tuulivoima pyrittiin toteuttamaan TAMKIn Greenlabistä löytyvillä tuulivoimakeskuk-  
silla. Kaksi tällaista keskusta oli rakennettu toimimaan yhdessä TAMKIn tuulivoima-  
turbiinin kanssa. Yksi kaapeista on esillä kuvassa 11.



KUVA 11. Tuulivoiman sähkökeskus.

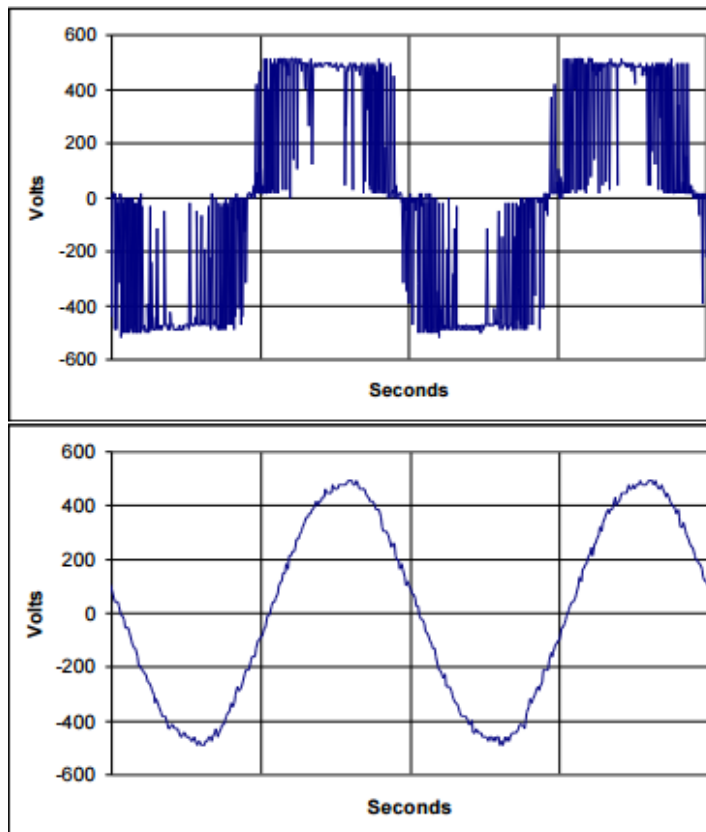
Tämä keskus sisältää tarvittavat releet ja automatiikan tuulivoiman verkkoon tahdistuk-  
seen. Keskusta ei ollut käytetty vuosiin, mutta sisällä olevat taajuusmuuttajat ja releet  
käynnistyivät ongelmitta. Keskus yhdistettiin malliin, mutta sitä ei saatu syöttämään  
energiaa verkkoon päin. Automatiikan logiikkaa tutkimalla huomattiin syyn johtuvan  
taajuusmuuttajasta. Taajuusmuuttaja valitti jatkuvasti ylivirrasta, vaikka mitään syytä  
tälle ei löytynyt. Ajan puitteissa päätettiin kokeilla toista hieman samanlaista keskusta,  
mutta myös yksi sen taajuusmuuttajista valitti kommunikaatiovirheestä. Taajuusmuutta-  
jassa ei ollut ohjauspiiriä sisältävää näyttöä, joten sen parametreihin pääsi käsiksi vain  
ethernet-yhteyden avulla. Kommunikaatioon tarkoitettu ohjelma ei kuitenkaan saanut  
taajuusmuuttajaan yhteyttä, joten tuulivoima päätettiin toteuttaa toisin.

Vaihtoehtojen puutteessa päädyttiin kokeilemaan TAMKIn sähkövoimatekniikan laboratoriosta löytyvää moottorin ohjaukseen tarkoitettua ACS 601 -mallin taajuusmuuttajaa, joka näkyy kuvassa 12.



KUVA 12. Taajuusmuuttaja ja virtavaunu.

Taajuusmuuttajaa syötettiin virtavaunulla, joka vastaisi tuulivoiman turbiinin syöttämää tehoa. Sen jännitettä ja täten myös tuulivoiman tehoa pystyi säätämään. Taajuusmuuttajan ulostulo yhdistettiin sinisuotimen kautta kuormalle. Koska taajuusmuuttajan tuottama vaihtojännite on vaihtosuuntaajan toiminnasta johtuen epäsinimäistä, tarvitaan sen siistimiseksi sinisuodin. Esimerkki jännitteestä ennen ja jälkeen sinisuotimen on esitetty kuvassa 13.



KUVA 13. Jännite taajuusmuuttajalta (ylempi) ja sinisuotimen jälkeen (alempi). (kuva: Trafomic)

Nyt kun ulostulevan jännitteen laatu on sinimäistä, käy sen liittäminen kuormalle. Taajuusmuuttaja saatiin syöttämään 50 Hz jännitettä kuormalle, kun sen parametri 99.04 asetettiin skalaarisäätöön. Taajuusmuuttajaa ei kuitenkaan saatu tahdistettua verkkoon. Yhdistettäessä kuorma jakeluverkkoon, taajuusmuuttaja antoi ylivirtavirheen ja katkaisi syötön. Valmistajalta tiedustellessa selvisi, että kyseistä taajuusmuuttajaa ei ole suunniteltu toimimaan yhdistettynä suoraan verkkoon, mutta erikseen on olemassa verkkoon generaattorin tehoa jarruttavia taajuusmuuttajia.

Toimiakseen tuulivoima tarvitsisi toisenlaisen ratkaisun. Ratkaisu voi olla esimerkiksi aikaisemmin mainittujen tuulivoimakeskusten korjaus, sillä niiden taajuusmuuttajat pystyvät syöttämään tehoa verkkoon päin. Toinen tutkittava mahdollisuus on käyttää säädeltävää tasasähköteholähdettä, jonka jännite muunnettaisiin kolmivaiheiseksi pääjännitteeltään 400 V sähköksi. Tämä vaatii kuitenkin investointeja tarvittuihin laitteisiin. Tuulivoimalta halutaan myös mahdollisuutta säätää ulostulevaa virtaa, mitä pelkästään taajuusmuuttajalla ei voi tehdä.

#### **4.4 Säättövoima**

Alkuperäinen suunnitelma sisälsi tuotantoteholtaan vaihtelevien aurinko- ja tuulivoiman rinnalle jonkin säättövoimalähteen, esimerkiksi simuloidun vesivoiman. Tämä jätettiin kuitenkin toistaiseksi toteuttamatta, sillä sen toteutus olisi vastannut jo toteutettuja ratkaisuja. Ilman tarkoituksenmukaisia laitehankintoja säättövoima ei lisää malliin mitään merkittävää havainnollistavaa esimerkkiä, joten ajan puitteissa se jätettiin toteutettavaksi tulevaisuudessa.

## 5 MALLIN TARKASTELU JA KEHITYS

### 5.1 Ratkaistavat ongelmat

Jotta malli saataisiin prototyypistä käyttöön otettavaksi laboratoriotyöksi, on prototyypin kasauksessa ilmenneet ongelmat ratkaistava.

Prototyypissä jouduttiin käyttämään TAMKin sähkövoimatekniikan laboratoriosta ja Greenlabista löydettyjä laitteita, mutta lopullinen työ tulee vaatimaan sille tarkoitukseenmukaisten osien hankkimista. Esimerkiksi tuulivoiman ja aurinkovoiman toteutusta voi mallintaa sopivan tasasähköteholähteen avulla, jonka ulostulo muunnetaan tarvittavan suureksi kolmivaiheiseksi vaihtojännitteeksi.

Nykyinen prototyyppi vaatii myös liian paljon tilaa. Lopullisesta mallista halutaan mahdollisesti joko pöydälle tai seinälle mahtuvaa moduulista kokoonpanoa. Tämä vaatii todennäköisesti jännitetasoa pudottamista 400 voltista 50 volttiin, jolloin laitteiden koot pienenevät.

Eri tuotantotapojen mahdollisuus tahdistaa toisiinsa on huomioitava. Aurinkovoiman tahdistus generaattorin tuottamaan verkkoon onnistui, mutta tässä tapauksessa generaattorin tuottama verkko tahdistui aurinkoinvertterin tuottamaan sähköön, mikä teki manuaalisesta tahdistuksesta hankalaa. Laboratoriotyön kannalta kiinnostavaa on kuitenkin mahdollisuus toteuttaa tahdistus manuaalisesti automaattisen tahdistuksen rinnalla.

Prototyypistä poistetun automaation lisäys tulee pitää mielessä mallia suunnitellessa eteenpäin. Tähän kuuluvat esimerkiksi automaattinen tahdistus, arvojen mittaus koneelle ja etäohjaus. Koska mallista on mahdollista tehdä moduulinen, automaation lisäys erikseen mallin eri osiin on suositeltavaa. Esimerkiksi tuulivoiman automatisoidun mallin, joka sisältää tuulivoiman tuottaman virran säädön ja mittauksen tietokoneohjelman avulla, voi toteuttaa itsenäisenä omana projektina.

Verkon taajuuden laskeminen liian suurella kuormalla on tärkeää pitää mukana mallin toteutuksessa, sillä sähkönlaadun tarkkailu on oleellinen osa lopullista laboratoriotyötä.

Tämän takia kaikkien työssä käytettyjen teholähteiden virtaa pitää voida rajoittaa, ettei mikään energianlähde tuottaisi mallin kannalta loputonta määrää tehoa.

Lopullisessa mallissa kysyntäjousto ja tehotasapainon ylläpitäminen ovat oleellinen osa mallin toimintaa. Tämä vaatii kuitenkin aurinko- ja tuulivoiman tuottaman tehon säädettävyyttä, mikä ei prototyypissä vielä toimi.

## **5.2 Laboratoriotyön kannalta hyödyllisiä mittauksia**

Koska mallin tarkoitus on toimia tulevaisuudessa osana Tampereen ammattikorkeakoulun sähkövoimatekniikan mittauksia, täytyy mallin sisältää opiskelijoiden ja opettavien aiheiden kannalta kiinnostavia ja hyödyllisiä mittauksia.

Mallin avulla on tarkoitus selventää hajautetun sähköntuotannon toimintaa osana sähköverkkoa. Tähän kuuluvat eri energiantuotantomuotojen toiminta ja niiden yhdistäminen kulutukseen. Tuotetun sähkön laadun tarkkailu ja eri ongelmatilojen lisäyksien vaikutusten tutkiminen olisi myös osa mittauksia. Ongelmatiloja on esimerkiksi ylikuorma, vähäinen tuotanto ja verkon muut vikatilanteet.

Mallin kuormaa on mahdollista syöttää jakeluverkosta tai paikallisesti. Tällöin kuorman voi jättää yksinään hajautetun tuotannon kannettavaksi, jolloin kyse on saarekekäytöstä. Toisaalta hajautettu tuotanto voidaan yhdistää jakeluverkkoon, jolloin jakeluverkolle muodostu vähemmän kuormaa. Näiden manuaalien tahdistus toisiinsa on myös havainnollistava prosessi, joka on hyvä osa mittaustyötä.

## 6 YHTEENVETO

Hajautetun energiantuotannon verkkomallin prototyypin ominaisuuksia jouduttiin karsimaan lukuisista laitehankintoihin liittyvistä vastoinkäymisistä johtuen, joten mallia rakennettaessa jouduttiin tyytymään TAMKIn sähkövoimatekniikan laboratoriosta löytyvillä laitteilla toteutettuihin ratkaisuihin. Tästä johtuen alkuperäisen suunnitelman sisältämä automaatio ja etäohjaus jätettiin myös pois ensimmäisestä prototyypiversiosta.

Ongelmista huolimatta mallin peruskomponentit; kuten jakeluverkko, verkon kuorma, sekä aurinko- ja tuulivoima, saatiin toteutettua. Käytetyistä laitteista johtuen esimerkiksi aurinkosähkön ja tuulivoiman mallinnus ei toteuta kaikkia niiltä haluttuja ominaisuuksia, mutta tärkeimmät mallilta halutut toiminnot saatiin toimimaan. Toimiviin ominaisuuksiin kuuluu verkon taajuuden romahdus ylikuormatilanteessa, sekä aurinkosähkön onnistunut tahdistus verkkoon. Ylikuormatilanteesta saatiin aikaan onnistunut mitaus verkon kuorman suhteesta verkon taajuuden käyttäytymiseen, sekä aurinkosähkön onnistunut manuaalinen tahdistus todisti toteutustavan toimivuuden.

Työn aikana saatiin testattua monta suunnitelmaan ja rakennukseen liittyvää teoriaa, ja vastoinkäymiset antoivat opettavaa tietoa eri komponenttien toiminnasta. Vaikka mallia rakentaessa jouduttiin tyytymään suunniteltua yksinkertaisempaan ratkaisuun, saatiin työn jatkon kannalta kerättyä paljon oleellista tietoa.

Laboratoriomallin kehitys tulee vielä vaatimaan suunnittelua ja pohdintaa. Malliin liittyvät mittaukset ja verkon ongelmatilojen havainnollistus ovat yksi esimerkki projektin laajentamisesta. Opinnäytetyön dokumentointi pitää sisällään prototyypin toteutuksen kannalta kaiken tarpeellisen, jotta koestukset voidaan toteuttaa uudelleen.



## LÄHTEET

Vihanninjoki, V. 30.6.2015. Hajautettu energiantuotanto Suomessa. Suomen ympäristökeskus SYKE. [www.syke.fi](http://www.syke.fi). Luettu 10.5.2017

Hirvonen, R. Suomen Energiavisio 2030. VTT. [www.vtt.fi](http://www.vtt.fi). Luettu 17.5.2017.

Motiva. 15.11.2016. Auringonsäteilyn määrä Suomessa. [www.motiva.fi](http://www.motiva.fi). Luettu 2.5.2017.

Suomen tuulivoimayhdistys. Pientuulivoima. [www.tuulivoimayhdistys.fi](http://www.tuulivoimayhdistys.fi). Luettu 2.5.2017.

Motiva. 16.11.2016. Pienvesivoima. [www.motiva.fi](http://www.motiva.fi). Luettu 2.5.2017.

Suomen ympäristökeskus. 2007. Bioenergian uudet haasteet Suomessa ja niiden ympäristönäkökulmat. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 11/2007. SYKE. Luettu 6.5.2017.

Heinimäki, R. Sähköä kannattaa käyttää joustavasti. Energiateollisuus. [www.energia.fi](http://www.energia.fi). Luettu 22.5.2017.

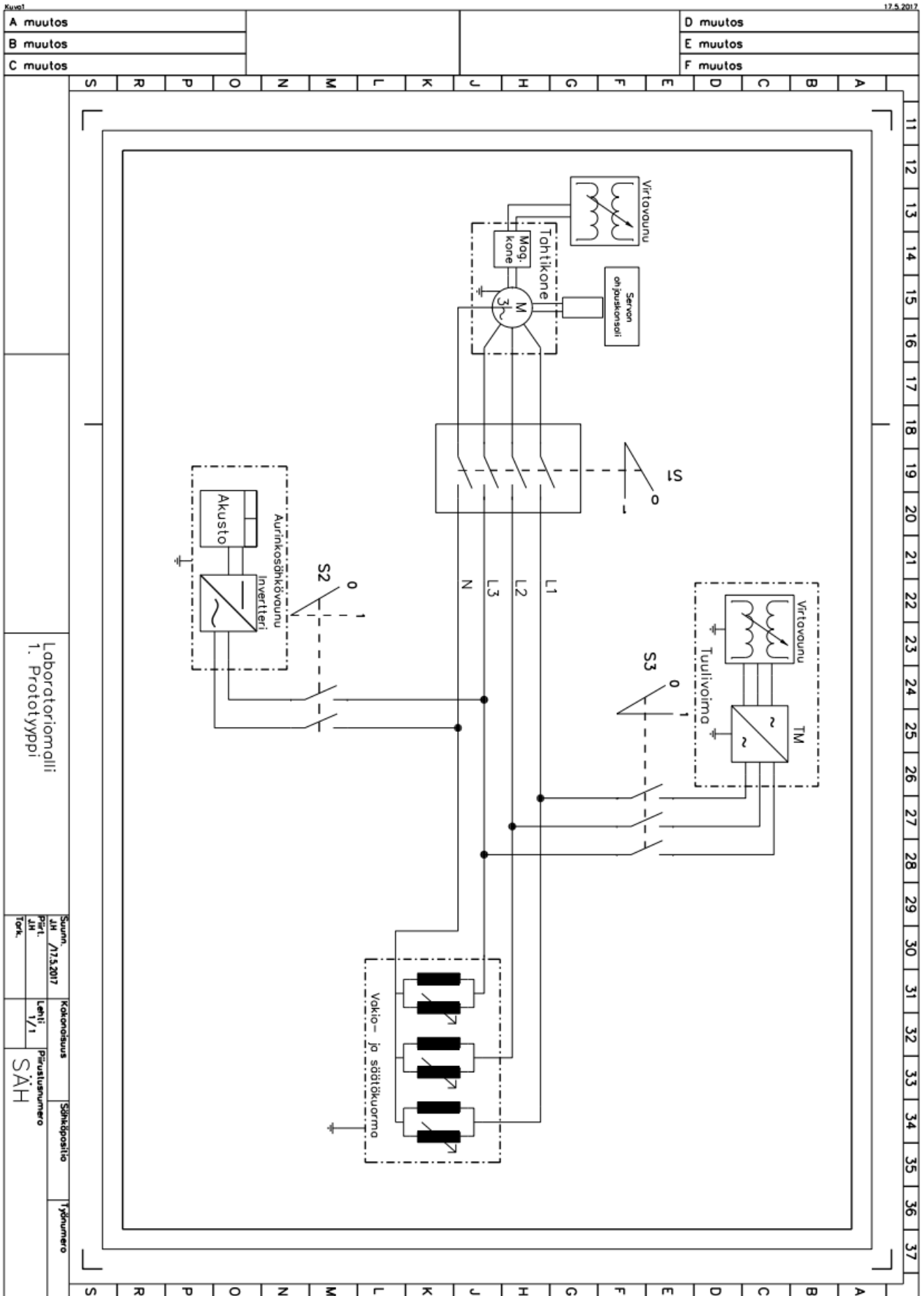
Sederlund, J. 3/2008. Taajuuden ylläpito sähköjärjestelmässä. [www.fingrid.fi](http://www.fingrid.fi). Luettu 6.5.2017.

Hietalahti, L. 2013. Sähkövoimatekniikan perusteet, 1. painos. Tammertekniikka.

Trafomic. Lisää tietoa siniaaltosuodattimesta (pdf). <http://www.trafomic.fi/assets/files/siniaaltosuodatin.pdf>. Luettu 12.5.2017.

LIITTEET

Liite 1. Prototyypin piirikaavio



## Liite 2. Ylikuormatilanteen mittaustulokset

KV = kiinteä vastus		SV = Sääto vastus		
KV (Ohm)	SV (Ohm)	Rtot (Ohm)	Taajuus (Hz)	Jännite (V)
-	-	-	50,05	231
480	276,6	175,2	50,08	231
480	259,2	168,3	50,01	230,5
480	259,2	168,3	50,08	230,1
480	241,6	160,7	49,82	228,5
480	238,7	159,4	49,7	228,3
480	230,5	155,7	49,65	227,4
480	229,4	155,2	49,45	226,5
480	220,1	150,9	48,6	222,5
480	211,3	146,7	47,76	218,7
480	210,0	146,1	47,2	216,5
480	203,7	143	46,47	213,2
480	198,6	140,5	45,73	209,4
480	196,5	139,4	45,15	206,8
480	183,4	132,7	43,67	200
480	160,0	120	39,31	179,1