



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

LIUKURENGASGENERAATTORIN KÄYTTÖ TUULIVOIMALASSA

Frans Gustafsson

Opinnäytetyö
Lokakuu 2017
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

GUSTAFSSON, FRANS:
Liukurengasgeneraattorin käyttö tuulivoimalassa

Opinnäytetyö 40 sivua, joista liitteitä 5 sivua
Lokakuu 2017

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia liukurengaskoneen käyttöä tuulivoimageneraattorina ja rakentaa sen pohjalta laboratoriotyö Tampereen ammattikorkeakoulun sähkövoimatekniikan suuntautumiseen. Opinnäytetyö muodostettiin osaksi Tampereen ammattikorkeakoulun sähkövoimatekniikan laboratorion mittausympäristöä, ja laboratoriotyö otetaan käyttöön uusiutuvia energiamuotoja käsittelevässä kurssikokonaisuudessa.

Laborioryön tarkoitus oli tutkia liukurengaskoneen erilaisia käyttötapoja tuulivoimalassa. Ensimmäinen tutkittava käyttötapo kuvasi vakionopeuksista tuulivoimalaa, sillä liukurengaskonetta käytettiin generaattorina tilanteessa, jossa liukurengaskoneen roottoriipiiri oikosuljettiin. Tämä tilanne vastasi tavallisen oikosulkugeneraattorin toimintaa. Seuraavissa vaiheissa siirryttiin vakionopeuksista tuulivoimalasta rajoitetusti muuttuvanopeuksiseen voimalatyyppeihin. Toisessa vaiheessa roottoriipiiriin tuotiin ulkoiset vastukset ja tutkittiin, miten roottoriipiirin resistanssin muuttaminen vaikuttaisi liukurengaskoneen akselin pyörimisnopeuteen. Laborioryön viimeisessä osassa tutkittiin kaksois-syötettyä rajoitetusti muuttuvanopeuksista tuulivoimalakäyttöä (DFIG).

Tavallisen oikosulkukoneen käyttö tuulivoimalan generaattorina ei ole aina kannattavaa, sillä roottorin vakionopeuksisuus heikentää väistämättä kokonaishyötysuhdetta vaihtelevilla tuulennopeuksilla. Laborioryön tarkoitus on tutkia ja todistaa, miten erilaisilla generaattorikäyttöillä saadaan suurempi osa tuulennopeuksista hyödynnettyä.

Opinnäytetyössä onnistuttiin, sillä Tampereen ammattikorkeakoulun sähkövoimatekniikan laboratorioon saatiin rakennettua toimiva mittausympäristö, jossa voidaan tutkia liukurengasgeneraattorin toimintaa. Opinnäytetyössä pystyttiin myös todistamaan, miten erilaisilla generaattorikäyttöillä saadaan hyödynnettyä paremmin eri tuulennopeudet.

ABSTRACT

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

GUSTAFSSON, FRANS:
Using Slip-Ring Engine in Wind Power Plant

Bachelor's thesis 40 pages, appendices 5 pages
October 2017

The purpose of this thesis was to create a laboratory project which investigates the usage of slip-ring engine as a generator in wind power plant. The laboratory project was made for the Electrical Power Engineering laboratory in Tampere University of Applied Sciences. This will be used in a course about renewable energy sources.

The purpose of the laboratory test is to investigate various methods for using a slip-ring engine in a wind power plant. In the first method the rotor circuit of the slip-ring engine was shorted out. In this method the slip-ring engine operated like a normal short circuit generator. This method is used in constant-speed wind power plants. The following methods investigate limited variable-speed wind power plants. Outside resistance connected in the rotor circuit in the second method. The second method investigates how the rotation speed varies when rotor resistance changes. The last method investigates Double Fed Induction Generator (DFIG).

Using a short circuit engine as a generator in wind power plants is not always cost-effective because the constant-speed rotor causes unavoidably weakening of the total efficiency when the speed of the wind varies. The purpose of the laboratory test is to research and prove how to raise the total efficiency with different methods of using generator.

The result of the thesis was a research in Electrical Power Engineering Laboratory in Tampere University of Applied Sciences where slip-ring engine can be investigated by students. The thesis also proved how different methods of generator usage can raise the total efficiency of wind power plant.

Key words: wind power, slip-ring engine, generator

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	EPÄTAHTIKONEEN KÄYTTÄMINEN TUULIVOIMALAN GENERAATTORINA	8
2.1	Epätahtikoneiden toiminta	8
2.2	Vakionopeuksinen tuulivoimala	11
2.3	Kaksoissyötetty rajoitetusti muuttuvanopeuksinen tuulivoimala	13
3	LIUKURENGASEPÄTAHTIGENERAATTORIN TUTKIMINEN	15
3.1	Mittausympäristö	15
3.2	Liukurengasepätahtigeneraattorin roottoripiiri oikosuljettuna	17
3.3	Kolmivaihevastuksen vaikutus roottoripiirissä.....	19
3.3.1	Taajuusmuuttaja kytkettynä liukurengasgeneraattorin roottoripiiriin	22
4	LABORATORIOTYÖOHJE	25
4.1	Liukurengasgeneraattorin tutkiminen roottorin ollessa oikosulussa.....	25
4.2	Liukurengasgeneraattorin tutkiminen roottoriresistanssin muuttuessa....	29
4.3	Liukurengasgeneraattorin tutkiminen kaksoissyötettynä.....	30
5	POHDINTA.....	34
	LÄHTEET.....	35
	LIITTEET	36
	Liite 1. Tuulta mallintavaa oikosulkumootoria ohjaavan taajuusmuuttajan kilpiarvot.....	36
	Liite 2. Mittauksissa käytetty kolmivaihevastus ja tehohäviöiden mittaamiseen käytettävät mittalaitteet.....	37
	Liite 3. Roottoripiiriin kytketyn ACS 800 – taajuusmuuttajan tiedot	38
	Liite 4. Vacon NXI – taajuusmuuttajan tiedot	39
	Liite 5. LC-suotimen tiedot	40

LYHENTEET JA TERMIT

DFIG	Double Fed Induction Generator, kaksoissyötetty liukurengasepätahtigeneraattori
f	sähköverkon taajuus
I_K	epätahtikoneen ottama käynnistysvirta
I_N	epätahtikoneen nimellisvirta
I_S	epätahtikoneen ottama virta
n	roottorin pyörimisnopeus
n_s	staattorikentän pyörimisnopeus
n_N	epätahtikoneen nimellipyörimisnopeus
p	epätahtikoneen napapariluku
P_N	epätahtikoneen mekaaninen teho
rpm	rounds per minute, kierroksia minuutissa
s	epätahtikoneen jättämä
SCIG	Squirrel Cage Induction Generator, häkkikäämitty epätahtigeneraattori
T	epätahtikoneen momentti
T_{\max}	epätahtikoneen kippimomentti

T_N	epätahtikoneen nimellismomentti
T_S	epätahtikoneen käynnistysmomentti
WRIG	Wound Rotor Induction Generator, liukurengasepätahtigeneraattori
ω_N	epätahtikoneen kulmanopeus

1 JOHDANTO

Vakionopeuksisen tuulivoimalan etuja ovat edullinen hinta ja tekninen yksinkertaisuus. Vakionopeuksisessa tuulivoimalassa käytetty oikosulkugeneraattori on toiminnaltaan yksinkertainen ja suhteellisen halpa kokonaisuus. Tämä tuulivoimalatyypin on kuitenkin jo jäämässä taka-alalle megawatti-luokan tuulivoimaloissa, sillä vakionopeuksisella tuulivoimalalla ei saada hyödynnettyä kovin suurta osuutta eri tuulennopeuksista. Siksi vakionopeuksinen tuulivoimala onkin aina aerodynaamisen hyötysuhteensa osalta heikompi kuin muuttuvanopeuksiset tuulivoimakonseptit. Vakionopeuksisen tuulivoimalan rinnalle on kehitetty rajoitetusti muuttuvanopeuksinen tuulivoimala, jonka avulla saadaan suurempi osa tuulen nopeuksista hyödynnettyä, kuin vakionopeuksisella tuulivoimalalla.

Tässä opinnäytetyössä rakennetaan Tampereen ammattikorkeakoulun sähkövoimatekniikan laboratorioon mittaussympäristö, jossa voidaan tutkia liukurengaskoneen käyttöä tuulivoimalassa erilaisissa käyttötilanteissa.

Opinnäytetyön jakautuu kolmeen osaan. Ensimmäisessä osassa tutustutaan ensin epätahतिकoneiden sekä erilaisten tuulivoimalatyypin teoriaan. Erilaisista tuulivoimalatyypeistä tutustutaan vakionopeuksiseen sekä rajoitetusti muuttuvanopeuksiseen tuulivoimalaan.

Opinnäytetyön toisessa osassa toteutetaan mittaussarja, jossa liukurengaskonetta käytetään kolmessa erilaisessa käyttötilanteessa. Ensimmäisessä tilanteessa liukurengasgeneraattorin roottoriipiiri on oikosuljettu. Toisessa tilanteessa liukurengaskoneen roottoriipiiriin kytketään ulkoiset vastukset, ja kolmannessa mittaussarjassa tutkitaan kaksoissyötettyä rajoitetusti muuttuvanopeuksista generaattorikäyttöä (DFIG).

Työn viimeisessä vaiheessa esitetään laboratoriotyöohje, jonka avulla Tampereen ammattikorkeakoulun sähkötekniikan opiskelijat voivat perehtyä liukurengasgeneraattorin toimintaan ja mallintaa erilaisia generaattorikäyttötilanteita.

2 EPÄTAHTIKONEEN KÄYTTÄMINEN TUULIVOIMALAN GENERAATORINA

2.1 Epätahtikoneiden toiminta

Epätahtikoneet, jotka tunnetaan myös nimillä induktiokone sekä oikosulkukone, ovat teollisuuden yleisin sähkökonetyyppi. Syitä siihen, miksi epätahtikoneet ovat niin yleisiä teollisuudessa, on monia. Epätahtikoneet ovat tekniikaltaan suhteellisen yksinkertaisia, jolloin niiden hinta on edullinen. Halvan hinnan ja yksinkertaisuuden lisäksi epätahtikoneiden kestävyys on hyvä. Epätahtikonetta voidaan käyttää generaattorina, mutta yleisemmin epätahtikonetta käytetään moottorina. (Hietalahti 2013, 34)

Epätahtikoneessa ei ole erillistä magnetointikäämitystä, vaan käämitykset sijaitsevat sekä staattorissa, että roottorissa. Roottorin käämitys on sijoitettu roottorin uriin ja se on suljettu oikosulkurenkaalla molemmista päistä. Yleisesti roottorikäämityksessä käytetään yhtä sauvaa jokaista uraa kohti, mutta eri ominaisuuksia haettaessa sauvan muoto ja lukumäärä voivat vaihdella. Epätahtikoneen roottorin käämitystä kutsutaankin ns. häkkikäämitykseksi. Epätahtikoneen staattorikäämitys on symmetrinen ja se kytketään joko kolmioon tai tähteen. Kun epätahtikonetta syötetään kolmivaihevirralla, synnyttää staattorikäämitys koneen sisälle pyörivän magneettikentän. Tämä magneettikentän vuoviivat leikkaavat roottorin käämityksen sauvoja, jolloin roottorisauvoihin indusoituu lähdejännite. Roottorivirta saadaan aikaan oikosulkemalla roottorisauvat. Roottorivirran aiheuttaman magneettikentän ja staattorin aikaansaaman magneettikentän välille syntyy voimavaikutus, joka pyrkii saamaan roottorin pyörivään liikkeeseen. Mikäli tästä syntyvä vääntömomentti ylittää pyörimistä vastustavan momentin, lähtee roottori pyörimään.

Epätahtikoneen roottori pyörii aina eri nopeutta kuin staattorikenttä. Epätahtikoneen nimitys perustuukin juuri siihen, että roottori ja staattori pyörivät eri vauhtia. Staattorikentän pyörimisnopeus n_s , riippuu verkon taajuudesta f ja epätahtikoneen napaparien lukumäärästä p , kaavan

$$n_s = \frac{f}{p} \quad (1)$$

mukaisesti. Esimerkiksi jos 50 Hz:n sähköverkkoon kytkettäisiin 4-napainen epätahtikone, jonka napaparien lukumäärä olisi 2, saataisiin staattorikentän pyörimisnopeudeksi kaavan 1 osoittamalla tavalla 1500 rpm.

Epätahtikoneen roottorin ja staattorikentän pyörimisnopeuksien eroja käsiteltäessä puhutaan usein suhteellisesta jättämästä, tai lyhemmin jättämästä. Jättämällä s tarkoitetaan staattorikentän sekä roottorin pyörimisnopeuksien suhdetta ja matemaattisesti jättämää voidaan tarkastella kaavan

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \% \quad (2)$$

avulla, jossa n_s on staattorikentän pyörimisnopeus ja n on roottorin pyörimisnopeus.

Kun epätahtikonetta kuormitetaan täydellä kuormalla, on jättämä s usein noin 2-5 % riippuen konetyypistä. Kuormitusta kasvattaessa moottorin nopeus pienenee, jolloin roottorisauvoihin indusoituu suurempi lähdejännite ja virta.

Epätahtikoneen sanotaan vääntävän nimellismomentilla T_N , kun moottori on kytkettynä nimellisjännitteeseen ja antaa koneen arvokilpeen leimatun nimellistehonsa verran mekaanista tehoa. Epätahtikoneen momentin ja tehon välinen yhteys on kaavan 3 mukainen:

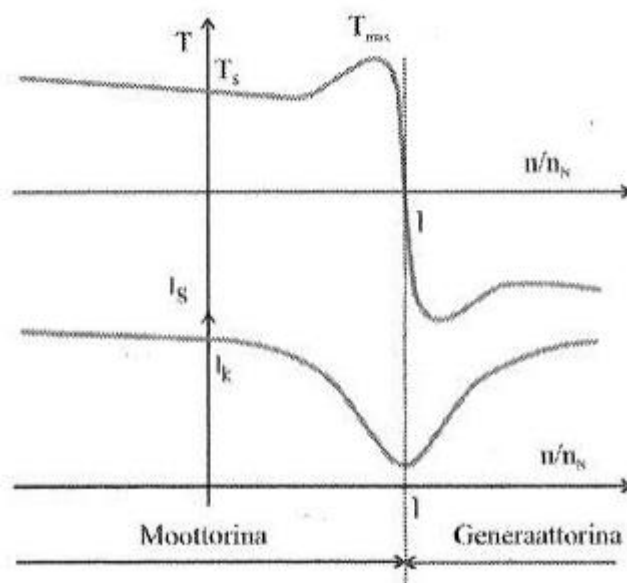
$$T_N = \frac{P_N}{\omega_N} = \frac{P_N}{2\pi \cdot \frac{n_N}{60}}, \quad (3)$$

jossa T_N on nimellisvääntömomentti newtonmetreinä, P_N moottorin mekaaninen teho watteina, ω_N kulmanopeus radiaaneina per sekunti ja n_N nimellispöörimisnopeus kierroksina minuutissa.

Kuvassa 1 näkyy epätahtikoneen momentin T ja virran I_S käyttäytyminen nopeuden funktiona. Epätahtikoneen käynnistyessä ottaa se verkosta suuren käynnistysvirran I_K , joka on usein 4-8 kertainen epätahtikoneen nimellisvirtaan I_N nähden. Kuvassa näkyvä käynnistysmomentti T_S kertoo, miten koneen momentti käyttäytyy käynnistyksen aikana, ennen nimellisen toimintapisteen saavuttamista. Käynnistyksen aikainen vääntömomentti on nimellistä momenttia T_N huomattavasti suurempi.

Kun epätahtikonetta käytetään moottorikäytössä, vaikuttaa momentti pyörimissuuntaan. Kun roottori saavuttaa staattorikentän pyörimisnopeuden eli jättämän arvon ollessa nolla, on myös koneen vääntömomentti nolla. Roottorin pyöriessä staattorikentän nopeutta, ei roottoriin synny lainkaan lähdejännitettä tai virtaa. Tämä johtuu siitä, että roottorin näkökulmasta magneettikenttä ei muuttuisi lainkaan, jolloin roottoriin ei tapahdu minkäänlaista jännitteen indusoitumista. Tätä ennen saavutetaan kuitenkin koneen maksimivääntömomentti T_{max} . Maksimimomentti on tyypillisesti 2-3 kertaa nimellismomentin suuruinen. Epätahtikonetta voidaan kuormittaa hetkellisesti maksimimomentilla, mutta jatkuva käyttö aiheuttaa koneen ylikuumentumisen.

Kun epätahtikoneen roottori alkaa pyöriä nopeammin kuin staattorikenttä, toimii kone generaattorina. Generaattorikäytössä roottorin pyörimisnopeus kasvaa suuremmaksi kuin staattorikentän, jolloin jättämä on jotain 0:n ja -1:n välillä. Epätahtikoneen toimiessa generaattorina, roottorin näkökulmasta magneettikentän suunta kääntyy, jolloin myös tehon etumerkki vaihtuu negatiiviseen. Tällöin kone alkaa muuttaa liike-energiaa sähköenergiaksi. Epätahtikoneen akselia täytyy kuitenkin pyörittää voimakoneen avulla, jotta päästäisiin tahtinopeuden yläpuolelle. Mikäli epätahtikonetta käytetään generaattorina, peilautuu momenttikäyrä negatiiviselle momenttialueelle, mutta käyrän muoto pysyy kuitenkin samanlaisena kuin moottorikäytössäkin. (ABB 2001, 10; Hietalahti 2011, 71; Hietalahti 2013, 43–45; Korppinen 1998a, 9; Paavola & Lehtinen 1982, 224, 236)



KUVA 1. Oikosulkumoottorin tyypillinen momentti- ja virtakäyrä nopeuden ja jättämän funktiona (Hietalahti 2011, 71)

Roottoriresistanssi vaikuttaa huomattavasti vääntömomenttikäyrään. Mikäli roottoriresistanssin arvo olisi nolla ohmia, ei epätahtikone pääsisi pyörimään yli tahtinopeutensa sillä indusoituvat pyörrevirrat eivät ideaalijohteen tapauksessa vaimenisi lainkaan. Todellisuudessa roottoripiirin resistanssi on aina yli nolla ohmia, jolloin jättämä kasvaa ja epätahtikone pääsee pyörimään tahtinopeuden yläpuolelle. Näin ollen suurempi roottorin resistanssi kasvattaa aina jättämää, jolloin koneen jäykkyys vähenee. Resistanssin suuruudella on siis suuri vaikutus koneen jäykkyyteen.

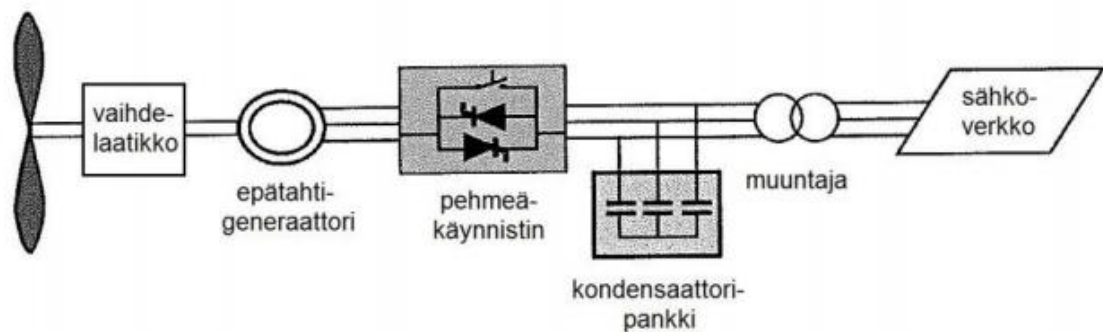
Epätahtikonegeneraattoria voidaan kutsua myös induktiogeneraattoriksi. Tämä nimitys perustuu siihen, että induktiogeneraattorille on tyypillistä, että energian siirto roottoriin tapahtuu magneettikentän roottorissa synnyttämän induktion välityksellä, eikä energian siirto vaadi galvaanista yhteyttä. (Hietalahti 2013, 35)

Epätahtigeneraattorit voidaan jakaa roottorikäämityksien mukaan kahteen eri luokkaan. Erilaiset roottorikäämitykset ovat häkkikäämitys, jota käsiteltiin jo aiemmin, sekä liukurenkailla toteutettu käämitys. Jälkimmäisessä käämitystavassa roottorikäämityksen toiset päät tuodaan ulos roottorin akselille, jossa sijaitsevat liukurenkaat ja joita liukuharjat laa haavat. Liukurengaskäämityksellä varustettu epätahtigeneraattorin ei siis tarvitse olla oikosuljettu, vaan se mahdollistaa erilaisten lisälaitteiden liittämisen roottoripiiriin. Erilaisilla roottoripiiriin kytkettävillä voidaan muuttaa generaattorin sähköisiä ominaisuuksia, kuten jättämää. Liukurengaskäämityksellä varustettua epätahtigeneraattoria kutsutaan nimellä liukurengasgeneraattori. (Hietalahti 2013; Korpinen 1998a, 9; Kärnä & Saransaari 1978, 154)

2.2 Vakionopeuksinen tuulivoimala

Vakionopeuksinen tuulivoimala oli 2000-luvun alussa vielä suosituin megawatti-luokan tuulivoimalatyypin nimi viittaa jo sen toimintatapaan. Vakionopeuksinen tuulivoimala suunnitellaan sellaiseksi, että tahtinopeus saavutetaan jo pienillä tuulennopeuksilla. Tuulennopeuden kasvaessa kasvaa roottorin pyörimisnopeus vain vähän jättämän puitteissa, kuten luvussa 2.1 kerrotaan. Vakionopeuksisessa tuulivoimalassa generaattorina käytetään epätahtigeneraattoria, joka on tyypillisesti joko häkkikäämitetty epätahtigeneraattori (squirrel cage induction generator, SCIG) tai liukurengasgeneraattori (wound rotor induction generator, WRIG). Roottorin pyörimisnopeus

saadaan halutuksi verkon taajuuden, generaattorin napapariluvun sekä vaihdelaatikon välityssuhteen avulla. Tuulivoimalan rottori kytketään vaihdelaatikon välityksellä generaattoriin. Vaihdelaatikkaa tarvitaan, jotta turbiinin pyörimisnopeudet (10–25 rpm) saadaan muutettua epätahtigeneraattorille sopiviin nopeuksiin (1000–1500 rpm). Tässä tuulivoimalatyypissä generaattori kytketään verkkoon suoraan pehmokäynnistimen, kondensaattoripankin sekä muuntajan kautta kuvan 2 osoittamalla tavalla. Kondensaattoripankilla kompensoidaan tuotettua loistehoa ja pehmokäynnistimellä pienennetään käynnistämisen yhteydessä esiintyviä virtapiikkejä.

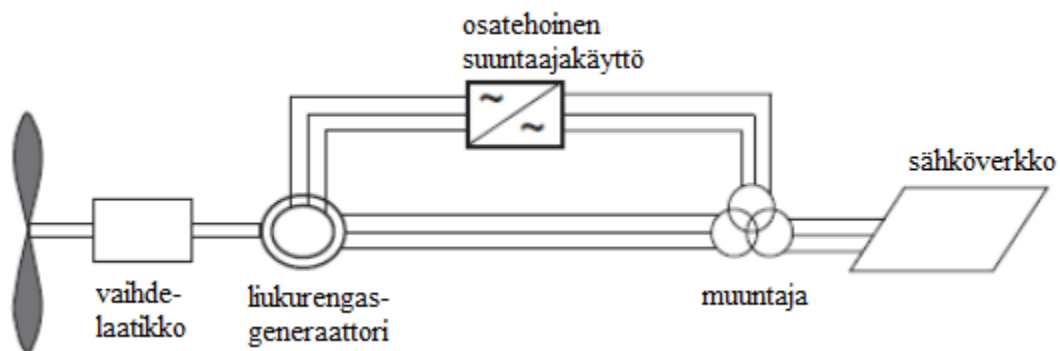


KUVA 2. Vakionopeuksinen tuulivoimala (Korpela 2016, 78, muokattu)

Vakionopeuksisen tuulivoimalan hyvänä puolena on verkkoon kytkennän yksinkertaisuus. Tämä johtuu siitä, että vakionopeuden ansiosta epätahtigeneraattori saadaan tuottamaan sähköenergiaa verkon kannalta sopivalla taajuudella ilman taajuusmuuttajaa. Vakionopeuksinen tuulivoimala on yksinkertaisuuden lisäksi luotettava, sekä suhteellisen halpa. Kyseisen tuulivoimalatyypin huonoina puolina voidaan pitää sitä, että tuulivoimalan rottori on optimoitava tietylle tuulennopeudelle, mikä tarkoittaa sitä, ettei vakionopeuksinen tuulivoimala pysty hyödyntämään tuulen energiaa kaikilla tuulennopeuksilla ilman aktiivista tehonsäätöjärjestelmää. Vaikka jokaisessa lavassa olisikin lapakulman säätö, ei kärjen nopeussuhdetta ole mahdollista pitää vakiona. Eli vaikka kohtauskulma saataisiinkin säädettyä jokaisella tuulennopeudella optimaaliseksi, vakionopeuksinen voimala on silti aina aerodynaaminen kompromissi. Tämän tuulivoimalatyypin toisena huonona puolena voidaan pitää sitä, että tuulennopeuden muutokset voivat aiheuttaa mekaanisia rasituksia vaihdelaatikkoon. (Ackermann 2005, 53–54; Korpela 2016, 77)

2.3 Kaksoissyötetty rajoitetusti muuttuvanopeuksinen tuulivoimala

Kaksoissyötetty rajoitetusti muuttuvanopeuksinen tuulivoimala eli DFIG-tuulivoimala (double fed induction generator) on 2000-luvulla tasaisesti suosiotaan kasvattanut tuulivoimalatyypin. Tämän tuulivoimalatyypin generaattorina käytetään liukurengasepätahtigeneraattoria (wound rotor induction generator, WRIG) ja muuttuvan nopeuden säätämisessä käytetään jättämän kasvattamista. Kuvassa 3 näkyy periaatteellinen kuva DFIG-tuulivoimalasta. Tuulivoimalan roottorin akseli on kytketty vaihdelaatikon kautta liukurengasepätahtikoneen akselille. Liukurengasepätahtikoneen staattori on kytketty muuntajan kautta suoraan sähköverkkoon ja roottori on osatehoiseen taajuusmuuttajaan. Roottori on kytketty taajuusmuuttajan jälkeen muuntajan kautta sähköverkkoon.



KUVA 3. DFIG-tuulivoimala (Korpela 2016, 78, muokattu)

DFIG-tuulivoimalan toiminta perustuu jättämän kasvattamiseen. Jättämää säädetään syöttämällä sopivantaajuinen ohjauksen jännite roottorille liukurenkaiden kautta. Roottoriin kytketty taajuusmuuttaja erottaa syötettävän sähköverkon taajuuden roottorin mekaanisesta taajuudesta. Jos roottori on oikosuljetaan, liukurengaskone toimii oikosulkukoneen tavoin, ja tällöin tuulivoimalasta tulee vakionopeuksinen, pyörimisnopeuden vaihdelta vain muutaman prosentin jättämän asettamissa rajoissa. Mutta jos liukurengaskoneen roottoriin syötetäänkin sopivaa ohjauksen jännitettä, pyörimisnopeuden vaihteluväliä on mahdollista kasvattaa merkittävästi. Kyse on käytännössä siitä, että roottoriin syötettävällä jännitteellä kumotaan sellaista magneettikentän muutosnopeutta, jonka roottorikäänitys tietyllä jättämällä näkee. DFIG-tuulivoimalaa käytetään juuri pyörimisnopeuden säätömahdollisuuden takia, sillä kaksoissyötetyllä rajoitetusti muuttuvanopeuksisella tuulivoimalakäytöllä saadaan hyödynnettyä myös huomattavasti tahtinopeuden yläpuolella olevat tuulennopeudet. DFIG mitoitetaan siten, että sähköntuotannon hinta €/W jäisi mahdollisimman pieneksi. Jos DFIG tuulivoimalan suuntaajakäyttö mitoitettaisiin

tuulivoimalan nimellisteholle, voitaisiin tällä tekniikalla toteuttaa aidosti muuttuvanopeuksinen tuulivoimala, jossa roottorin pyörimisnopeus seuraisi likimain lineaarisesti tuulennopeuden muutoksia. Suuntaajakäyttö on kuitenkin komponenttina kallis, joten vaikka aito muuttuvanopeuksisuus kasvattaisikin tuotetun sähköenergianmäärää, ei sähkötuotannon hinta €/W olisi alhaisimmassa arvossaan. Tästä syystä suuntaajakäyttö mitoitetaan yleensä noin 30 %:iin tuulivoimalan nimellistehosta.

3 LIUKURENGASEPÄTAHTIGENERAATTORIN TUTKIMINEN

Liukurengasgeneraattoria tutkittiin kolmessa eri käyttötarkoituksessa. Ensimmäisessä vaiheessa tutkittiin, miten liukurengasgeneraattori toimii tilanteessa, jossa generaattorin roottoriipiiri oli oikosuljettu. Toisessa vaiheessa liukurengasgeneraattorin roottoriipiiriin kytkettiin kolmivaihevastukset ja tutkittiin, miten resistanssin arvon muuttuminen roottoriipiirissä vaikuttaa generaattorikäyttöön. Tutkimusten viimeisessä vaiheessa rakennettiin kaksoissyötetty muuttuvanopeuksinen tuulivoimala, jolloin roottoriipiiriin kytkettiin vastusten sijasta osatehoinen taajuusmuuttajakäyttö.

3.1 Mittausympäristö

DFIG – käytön tutkimuksia varten rakennettiin demolaitteisto Tampereen ammattikorkeakoulun sähkövoimatekniikan laboratorioon. Mittauksia varten tarvittiin 4-napainen oikosulkumoottori, jolla pyöritettiin tutkittavaa liukurengasgeneraattoria. Kyse oli siis tuulen aiheuttaman voimavaikutuksen mallintamisesta, ja tähän tarkoitukseen käytettiin ABB:n kolmivaiheista M3AA 160 MLD 4 -oikosulkumoottoria. Tuulta mallintava oikosulkumoottori oli 2,2 kW:n moottori, jonka staattori kytkettiin kolmioon 400 V:n jännitteeseen. Kyseisen moottorin kilpiarvot on esitetty taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Tuulta mallintavan oikosulkumoottorin kilpiarvot

P (W)	U_n (V)	I_n (A)	$\cos\phi$	f (Hz)	n_n (rpm)
22000	400	40,7	0,85	50	1463

Taulukossa 1 P on moottorin mekaaninen teho watteina, U_n moottorin nimellisjännite voltteina, I_n moottorin nimellisvirta ampeereina, $\cos\phi$ on moottorin tehokerroin ja n_n moottorin nimellisyörimisnopeus 1/min. Kun halutaan tietää moottorin nimellistä vääntömomenttiä, sijoitetaan taulukosta 1 tarvittavat arvot aiemmin esitettyyn kaavaan 3. Tuulta mallintavan oikosulkumoottorin nimellismomentiksi T_n saadaan 143,6 Nm:

$$T_N = \frac{P_N}{\omega_N} = \frac{P_N}{2\pi \cdot \frac{n_N}{60}} = \frac{22\,000\text{ W}}{2\pi \cdot \frac{1463\text{ rpm}}{60\text{ s}}} = 143,6\text{ Nm}.$$

Tuulta mallintavaa oikosulkumoottoria ohjattiin ABB:n ACS 800 – taajuusmuuttajalla. Taajuusmuuttajaa käytettiin, jotta saatiin tuulta mallintavan moottorin vääntömomentti

tai pyörimisnopeus mahdollisimman tarkasti säädettyä eri tilanteita mallinnettaessa. Käytetyssä taajuusmuuttajassa oli useampi sovellusmakro käytettävissä. DFIG-käyttöä varten valittiin *MOMENTTISÄÄTÖ* – sovellusmakro, joka mahdollistaa moottorin ohjauksen säätämällä joko momenttia tai pyörimisnopeutta. Pääosa taajuusmuuttajan parametreista pidettiin tehdasarvoina. Taulukkoon 2 on koottu taajuusmuuttajan parametreihin tehdyt tärkeimmät muutokset.

Parametrilla 10.01 valittiin taajuusmuuttajan käynnistämiseen käytettävä lähde. Parametriksi valittiin *PANELI*, koska ohje käynnistämiseksi haluttiin antaa taajuusmuuttajan paneelista. Parametrilla 10.03 valittiin pyörimissuunta. Tähän valittiin ohjeeksi *PYYN-NÖSTÄ*, sillä pyörimissuunta haluttiin valita panelista. Seuraava muutettu parametri oli 11.01, jolla valittiin ohjauspaneelista annetun ohjeen tyyppi. Tähän parametriin valittiin ohjeeksi *REF2 (%)*, joka tarkoittaa annetun ohjeen olevan prosenttiohje. Tämän ohjeen valitseminen vaihtelee eri sovellusmakrojen mukaan, mutta valitussa *MOMENTTISÄÄTÖ* –sovellusmakrossa prosenttiohjeen valitseminen tarkoittaa prosentuaalista momenttiohjetta. Parametrilla 16.01 otetaan käyttöön käynnistyksenestosignaali, joka estää taajuusmuuttajan käytön. Tähän parametriin valittiin *EI*, sillä käynnistyksenestoa ei haluttu käyttää. Parametri 20.02 määrittää taajuusmuuttajaan kytketyn moottorin maksiminopeuden. Parametrin arvoksi valittiin 2300 rpm, jotta moottorin akseli ei pääsisi pyörimään käytön kannalta liian nopeasti. Seuraavalla muutetulla parametrilla valittiin käytetty sovellusmakro. Kuten jo aiemmin todettiin, valittiin tämän parametrin arvoksi *MOMENTTISÄÄTÖ*. Parametri 99.04 valitsee moottorin ohjaustavan. Tähän valittiin *DTC*, joka tarkoittaa suoraa momenttisäätöä. Parametrit 99.05 – 99.09 sisälsivät tuulta mallintavan koneen tiedot seuraavassa järjestyksessä: nimellisjännite, nimellisvirta, taajuus, nimellipyörimisnopeus sekä teho. Viimeinen muutettu parametri 99.10 sisälsi moottorin tunnustustavan. Moottorin tunnistuksen aikana taajuusmuuttaja tunnistaa moottorin ominaisuudet optimaalista moottorinohjausta varten. Tähän kohtaan valittiin *ID MAGN*, jolloin ID-ajoa ei toteuteta, vaan moottorin malli lasketaan ensimmäisen käynnistyksen yhteydessä magnetoimalla moottoria 20 sekunnista minuuttiin nollanopeudella. (ABB 2011, 101-192)

TAULUKKO 2. Taajuusmuuttajan parametreihin tehdyt tärkeimmät muutokset

para- metri	valittu nimi/arvo
10.01	PANELI
10.03	PYYNNÖSTÄ
11.01	REF2 (%)
16.01	EI
16.02	AVOIN
20.02	2300
99.02	MOMENTTISÄÄT
99.03	EI
99.04	DTC
99.05	400
99.06	40,7
99.07	50
99.08	1463
99.09	22
99.10	ID MAGN

3.2 Liukurengasepätahtigeneraattorin roottoriipiiri oikosuljettuna

Liukurengasepätahtigeneraattorin tutkiminen käynnistyi käyttötilanteesta, jossa generaattorin roottoriipiiri oikosuljettiin. Staattoriipiiri kytkettiin kolmioon 400 voltin sähköverkkoon. Tällöin liukurengasepätahtigeneraattori toimii täysin tavallisen oikosulkugeneraattorin tavoin. Generaattorin akseli oli kytketty yhteen tuulta mallintavan oikosulkumoottorin akselille. Jatkossa tuulta mallintavasta oikosulkumoottorista tullaan käyttämään nimeä ”tuulikone”. Generaattorin kilpiarvot on esitetty taulukossa 3. Taulukossa esitetyt sähköiset ominaisuudet ovat samoja kuin taulukossa 1.

TAULUKKO 3. Liukurengasepätahtigeneraattorin kilpiarvot

P (W)	U_n (V)	I_n (A)	$\cos f$	f (Hz)	n_n (rpm)
5500	400	11,5	0,82	50	1450

Generaattoria lähdettiin kuormittamaan siten, että tuulta mallintavaa moottoria ohjattiin momenttiohjeella. Momenttiohje haettiin aluksi sellaiseen pisteeseen, että liukurengas-kone siirtyi kuvassa 1 näkyvältä moottorikäytöltä generaattorikäyttöön. Tällöin tuulikone pyöritti generaattorin akselia yli generaattorin tahtinopeuden (1500 rpm) ja generaattori alkoi syöttää sähkötehoa sähköverkkoon. Oikosuljetun liukurengasepätahtigeneraattorin

mittaustulokset on esitetty taulukossa 4. Taulukon ensimmäinen arvo tarkoittaa tuulikoneen ohjaavan taajuusmuuttajan momenttiohjetta prosentteina. Momenttiohje saadaan todelliseksi vääntömomentiksi kertomalla momenttiohje tuulikoneen vääntömomentin arvolla. Näin ollen esimerkiksi 10 % momenttiohje on todellisuudessa $0,1 \times 143,6 \text{ Nm} = 14,3 \text{ Nm}$. Taulukon seuraava arvo n on generaattorin akselin pyörimisnopeus kierroksina minuutissa. Tämä arvo saatiin tuulikoneen taajuusmuuttajalta, sillä molempien koneiden pyörimisnopeudet olivat samat. Taulukossa I_{AVG} on generaattorin verkkoon syöttämien vaihevirtojen keskiarvo ampeereina ja U_{AVG} puolestaan on generaattorin verkkoon syöttämien vaihejännitteiden keskiarvo voltteina. Taulukon seuraava sarake P_{kok} on generaattorin verkkoon syöttämä kokonaisteho watteina. Tehon kohdalla pitää huomioida tuloksen etumerkki, sillä negatiivinen mittaustulos tarkoittaa, että generaattori syötti verkkoon sähkötehoa. Positiivinen etumerkki tarkoittaisi, että generaattori ottaa verkosta tehoa. Taulukon viimeisessä sarakkeessa oleva f tarkoittaa verkkoon syötetyn jännitteen taajuutta hertseinä.

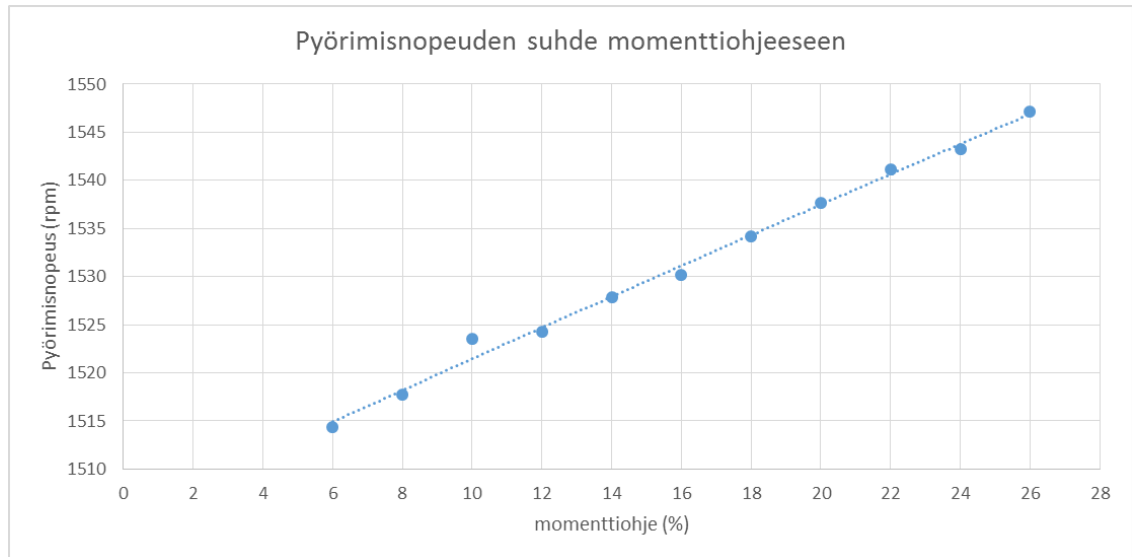
TAULUKKO 4. Generaattorikäytön mittaustulokset, kun roottoriipiiri oli oikosuljettuna

momenttiohje (%)	n (rpm)	I_{AVG} (A)	U_{AVG} (V)	P_{kok} (W)	f (Hz)
6	1514,4	6,8	230,8	-400	50,1
8	1517,7	7,1	231,8	-830	50,1
10	1523,5	7,4	232,2	-1260	50,1
12	1524,3	7,9	232,9	-1680	50,1
14	1527,9	8,3	233,4	-2110	50,1
16	1530,2	8,8	234,2	-2470	50,1
18	1534,2	9,3	234,7	-2960	50,1
20	1537,7	9,8	235,1	-3320	50,1
22	1541,1	10,4	235,9	-3720	50,1
24	1543,2	10,9	236,1	-4140	50,1
26	1547,2	11,5	237,2	-4520	50,1

Taulukon arvoista huomataan, että generaattorin verkkoon syöttämän jännitteen taajuus pysyy koko mittaussarjan ajan valtakunnallisesti sallituissa arvoissa, eikä se nouse liian korkeaksi.

Taulukon 4 avulla voidaan muodostaa kuvaaja 1, jossa tarkastellaan pyörimisnopeuden suhdetta annettuun momenttiohjeeseen. Kuvaajasta huomataan, että generaattorin akselin pyörimisnopeus kasvaa melko tasaisesti momenttiohjetta kasvattaessa. Huomionarvoista on kuitenkin se, että akselin pyörimisnopeus ei kasva prosentuaalisesti kovin paljon.

Tämä perustuu oikosuljettuun roottoriin. Luvussa 2.1 todettiin, että roottorin resistanssi vaikuttaa koneen jäykkyyteen. Kun roottoriin on oikosuljettu, on roottorin resistanssi lähellä nollaa, jolloin myös jättämä on pieni. Tämän takia momenttiohjeen kasvattaminen ei nosta generaattorin pyörimisnopeutta prosentuaalisesti kovinkaan paljon.



KUVAAJA 1. Pyörimisnopeuden riippuvuus momenttiohjeesta

Tämän mittaussarjan perusteella voidaan todeta, että kun liukurengasgeneraattorin roottoriin on oikosuljettu, saadaan tuulivoima hyvin yksinkertaisella kytkennällä tuottamaan sähköä verkkoon halutun taajuisena, eikä monimutkaisia tehoelektronikan komponentteja tarvita. Huonona puolena tämän kaltaisen sovellutuksen käyttämisessä on se, että oikosuljettu roottoriin ei pääse hyödyntämään tuulen suurempia nopeuksia, sillä kuten kuvaajasta 1 huomataan, generaattorin pyörimisnopeus ei kasva kovinkaan korkeaksi johtuen pienestä jättämästä.

3.3 Kolmivaihevastuksen vaikutus roottoriin

Liukurengasgeneraattorin tutkimisen toisessa vaiheessa tutkittiin, miten kolmivaihevastuksen lisääminen roottoriin vaikuttaisi pyörimisnopeuteen. Roottoriresistanssin vaikutus roottorin pyörimisnopeuteen on merkittävä, sillä kasvava roottoriresistanssi sallii jättämän kasvamisen. Mikäli roottoriresistanssi olisi nolla, oikosulkukone olisi tällöin täysin jäykkä, eli tahtinopeudesta ei olisi mahdollista poiketa lainkaan. Jos roottoriresistanssi on nolla, roottoriin indusoituvat virrat eivät vaimene lainkaan, ja siksi jättämäksi tulee nolla. Mitä suurempi roottorin resistanssi on, sitä nopeammin roottoriin

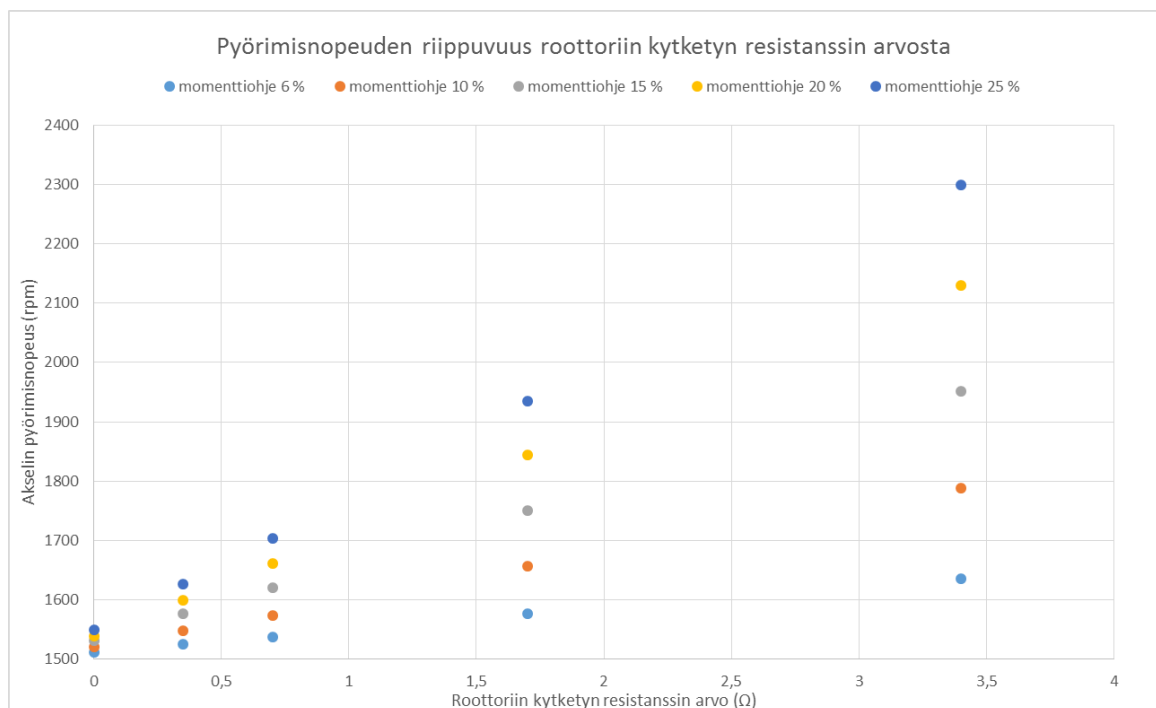
indusoituva virta vaimenee, ja sitä vähemmän jäykkä koneesta tulee. Tuulivoimaloissa on käytetty roottoriresistanssin kasvattamista tuulivoimalan roottorin pyörimisnopeuden kasvattamiseen. "Kyseisen käyttötavan taloudellinen kannattavuus ei kuitenkaan ole itsestään selvää, sillä resistanssin kasvattamisesta saavutettava taloudellinen hyöty häviää osittain vastusten lämpöhäviöihin. Juuri näistä syistä resistanssin kasvattamista roottori-piirissä ei juuri enää käytetä suuren kokoluokan tuulivoimaloissa, mutta DFIG:n toiminnan ymmärtämisen kannalta tämä on tärkeä osa tutkimustyötä.

Kolmivaihevastuksen vaikutuksia tutkittaessa pysyi kytkentä muuten samanlaisena kuin oikosuljetun roottorin tapauksessakin, mutta tällä kertaa roottoriin kytkettiin suoraan kolmivaiheinen säädettävä vastus. Mittaukset toteutettiin siten, että jälleen kerran generaattorin akseli saatettiin tuulikoneen avulla pyöriä liikkeeseen momenttiohjeella, minkä jälkeen vastuksen arvoa muutettiin ja mitattiin tästä aiheutuvat muutokset. Kun tämä oli toistettu viidellä eri vastuksen arvolla, kasvatettiin tuulikoneen momenttiohjetta suuremmaksi ja toistettiin mittaukset jälleen viidellä eri vastuksen arvolla. Tavoitteena oli osoittaa, että kasvava roottorin resistanssi vähentää epätahtikoneen jäykkyyttä, jolloin tietty momenttiohjaus pitäisi näkyä kasvavana pyörimisnopeutena. Mittaustulokset näistä mittauksista on esitetty taulukossa 5. Uutena muuttujana taulukossa on viimeinen sarake R_{roottori} , joka on roottoriin kytketyn vaihekohtaisen resistanssin arvo ohmeina.

TAULUKKO 5. Kolmivaihevastuksen vaikutus roottoriin

momenttiohje (%)	n (rpm)	$U_{v,AVG}$ (V)	$I_{v,AVG}$ (A)	P_{kok} (W)	$R_{roottori}$ (Ω)
6	1512	230,7	6,8	-430	0
6	1525	230,9	6,8	-420	0,35
6	1538	231,0	6,9	-420	0,7
6	1576	230,9	6,9	-410	1,7
6	1636	231,1	6,9	-390	3,4
10	1521,5	232,1	7,5	-1270	0
10	1548,6	232,2	7,5	-1240	0,35
10	1573,6	232,5	7,5	-1230	0,7
10	1656,4	232,2	7,6	-1210	1,7
10	1788,3	232,4	7,6	-1200	3,4
15	1531	234,1	8,6	-2300	0
15	1576	233,8	8,5	-2270	0,35
15	1621	233,7	8,6	-2250	0,7
15	1751	234,1	8,6	-2230	1,7
15	1952	233,9	8,7	-2150	3,4
20	1539,6	236,1	9,8	-3310	0
20	1600	235,8	9,8	-3290	0,35
20	1662	236,0	9,9	-3270	0,7
20	1844	235,9	10,0	-3250	1,7
20	2130	235,4	9,9	-3140	3,4
25	1549	237,5	11,2	-4320	0
25	1627	237,7	11,2	-4270	0,35
25	1704	237,4	11,2	-4250	0,7
25	1935	237,1	11,3	-4170	1,7
25	2299	236,9	11,3	-4090	3,4

Mittaustulosten perusteella muodostettiin kuvaaja 2, jossa näkyy roottoriin kytketyn vastuksen vaikutus pyörimisnopeuteen eri momenttiohjeilla. Kuvaajasta huomataan, että pyörimisnopeus pääsee kasvamaan suuremmaksi isommalla resistanssilla. Kuvaajasta huomataan myös, että pyörimisnopeuden muutos resistanssin muuttuessa on lineaarista.



KUVAAJA 2. Roottoriin kytketyn resistanssin vaikutus pyörimisnopeuteen

Tämän mittaussarjan tarkoituksena oli havainnollistaa, miten roottorin resistanssin muuttaminen vaikuttaa generaattorin pyörimisnopeuteen. Kuten jo aiemmin todettiin, muuttuu generaattorin pyörimisnopeus roottorin resistanssia muuttamalla. Tämä johtuu siitä, että resistanssin kasvattaminen kasvattaa myös jättämää, jolloin generaattorin akseli pääsee pyörimään sitä nopeammin, mitä suurempi roottoripiirin resistanssi on. Kun verrataan tilannetta, jossa roottoripiiri oli oikosuljettu tilanteeseen, jossa roottoripiirissä on ulkopuolinen säädettävä vastus, huomataan, että generaattorin tuottama kokonaisteho eroaa hieman. Oikosuljetun roottoripiirin tapauksessa generaattori tuotti sähköverkkoon noin 4,5 kW tehoa, kun taas jälkimmäisessä tapauksessa generaattori tuotti vain noin 4,1 kW, vaikka käytetyt momenttiohjeet olivat lähellä toisiaan (25 % ja 26 %). Tämä johtuu siitä, että kun roottoripiiriin tuodaan ulkopuolinen vastus, häviää osa generaattorin tehosta vastuksessa lämmöksi.

3.3.1 Taajuusmuuttaja kytkettynä liukurengasgeneraattorin roottoripiiriin

Liukurengasgeneraattorin tutkimisen viimeisessä vaiheessa tutkittiin, miten generaattorin akselin pyörimisnopeus käyttäytyy, kun roottoripiiriin kytketään taajuusmuuttaja, jolla syötetään roottoriin eri taajuisia sähköä kuin staattoripiiriin. Staattoripiiriin syötettiin edelleen 50 Hz:n vaihtojännitettä. Tarkoituksena oli siis rakentaa kaksoissyötetty rajoitustusti muuttuvanopeuksinen generaattoriratkaisu, joita käytetään DFIG-tuulivoimaloissa.

Taajuusmuuttajan lisääminen roottoriin ei sujunut ongelmitta, sillä aluksi generaattoria käynnistettäessä taajuusmuuttaja ilmoitti ylivirrasta aina käynnistettäessä ja tämän jälkeen kytkeytyi pois päältä. Taajuusmuuttajan ylivirta saatiin poistettua aluksi vastuksella, joka kytkettiin taajuusmuuttajan välipiiriin. Jälleen kerran vastuksen tuominen kytkentään tuotti ylimääräisiä tehohäviöitä, joten myöhemmässä vaiheessa välipiirin teho ohjattiin takaisin verkkoon *LC*-suotimen läpi, jolloin tehohäviöitä ei syntynyt. *LC*-suodinta käytettiin tasoittamaan välipiiristä saatavan sähköön laatua.

Kun rajoitetusti muuttuvanopeuksinen generaattori saatiin toimimaan oikein, toistettiin sillä taulukossa 6 esitetty mittaussarja. Mittaussarja toteutettiin siten, että jälleen kerran momenttiohje pidettiin vakiona ja roottoriin syötetyn jännitteen taajuutta vaihdettiin 0 ja 15 Hz:n välillä. Tämän jälkeen vaihdettiin momenttiohjetta suuremmaksi ja suuremmalla momenttiohjeella toistettiin mittauspisteet, joissa roottoriin jännitteen taajuutta vaihdettiin.

Roottoriin syötetty pienitaajuinen jännite aiheuttaa sen, että roottorin havaitsema magneetikentän muutos pienenee. Kun magneetikentän muutos pienenee, kasvaa roottorin ja staattorikentän pyörimisnopeuksien ero, eli jättämä. Jättämän kasvattaminen aiheuttaa generaattorin pyörimisnopeuden kasvamisen samalla tavalla, kuin kasvavan roottoriresistanssin tilanteessa. Pyörimisnopeuden kasvattaminen pienitaajuisella jännitteellä pystytään toteuttamaan pienemmällä häviöllä, kun roottoriresistanssin kasvattamisen tapauksessa.

Taulukosta 6 huomataan, että jo pieni muutos roottoriin jännitteen taajuudessa muuttaa generaattorin pyörimisnopeutta. Esimerkiksi, kun tarkastellaan mittauspistettä, jossa momenttiohje oli 6 % ja roottoriin jännitteen taajuus oli 5 Hz, generaattorin pyörimisnopeus oli 1649 kierrosta minuutissa. Seuraavassa mittauspisteessä momenttiohje pidettiin samana ja roottoriin jännitteen taajuutta nostettiin 7,5 Hz:iin, jolloin generaattorin akselin pyörimisnopeus nousi 1724 kierrokseen minuutissa. Näin ollen vain 2,5 Hz:n taajuuden muutos kasvatti generaattorin akselin pyörimisnopeutta 75 kierrosta minuutissa.

Taulukkoa 6 tarkasteltaessa on tärkeää huomata pyörimisnopeuden muutoksen lisäksi kokonaistehon muutos. Pienemmällä momenttiohjeella kokonaistehon muutos ei ole vielä kovin huomattavaa, mutta suuremmilla momenttiohjeilla myös verkkoon syötetyn kokonaistehon suuruus kasvaa roottoriin syötetyn taajuuden kasvaessa.

TAULUKKO 6. Roottoripiirin taajuuden kasvattamisen vaikutukset liukurengas-generaattorissa

momenttiohje (%)	n (rpm)	$U_{v,AVG}$ (V)	$I_{v,AVG}$ (A)	P_{kok} (W)	$f_{roottori}$ (Hz)
6	1523	232,3	6,9	-320	0
6	1649	233,0	5,3	-330	5
6	1724	233,0	5,7	-340	7,5
6	1799	232,3	5,9	-350	10
6	1875	232,6	6,1	-360	12,5
6	1949	232,5	6,3	-360	15
10	1541	233,6	7,7	-1150	0
10	1648	236,1	4,8	-1220	5
10	1722	236,2	5,3	-1290	7,5
10	1797	236,0	5,5	-1340	10
10	1872	235,9	5,8	-1390	12,5
10	1962	235,8	6,0	-1440	15
15	1556	235,1	8,9	-2190	0
15	1648	238,7	5,0	-2300	5
15	1722	239,3	5,4	-2430	7,5
15	1797	238,8	5,8	-2520	10
15	1871	238,8	6,2	-2650	12,5
15	1962	238,6	6,6	-2730	15
20	1578	237,1	10,2	-3250	0
20	1649	241,0	5,8	-3330	5
20	1723	241,4	6,1	-3500	7,5
20	1797	241,5	6,5	-3650	10
20	1874	241,4	7,1	-3820	12,5
20	1949	241,5	7,6	-3960	15

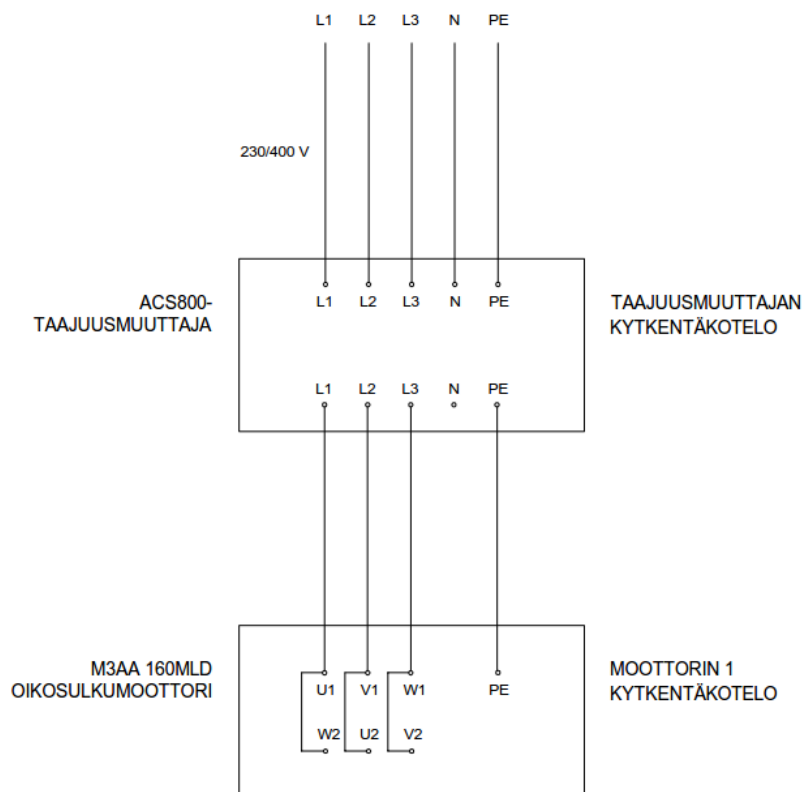
Taulukon 6 mittausarja näyttää hyvin muuttuvanopeuksisen tuulivoimalan hyödyn, sillä muuttuvanopeuksisella generaattorikäytöllä saadaan tuulen isotkin nopeudet hyödynnettyä suhteellisen edullisella investoinnilla.

4 LABORATORIOTYÖOHJE

Tämän laboratoriotyön tarkoitus on ensisijaisesti tutustua erilaisiin generaattorikäyttöihin, joita voidaan hyödyntää tuulivoiman tuotannossa suuren kokoluokan tuulivoimaloissa. Työn toinen tarkoitus on ymmärtää perusteet liukurengasmootorin toiminnasta kolmessa erilaisessa käyttötilanteessa.

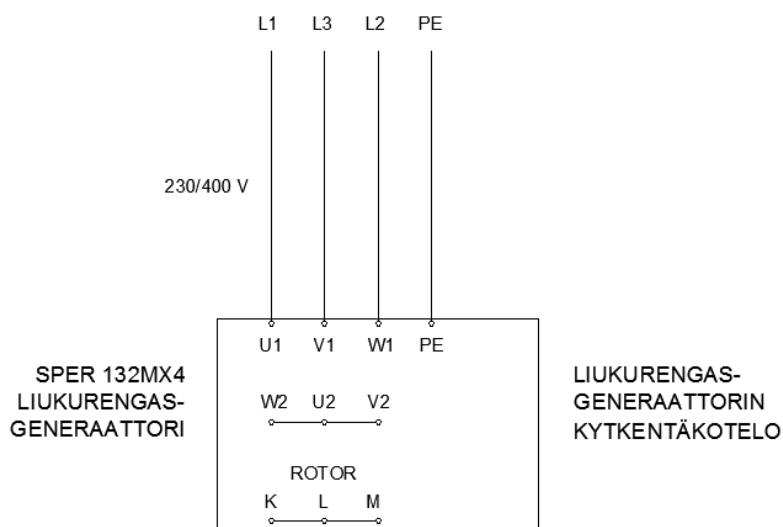
4.1 Liukurengasgeneraattorin tutkiminen roottorin ollessa oikosulussa

Työn ensimmäisessä vaiheessa tutkitaan liukurengasgeneraattorin toimintaa, kun roottori on oikosulussa. Mittauksissa käytetään tavallista oikosulkumoottoria, jonka akseli on yhdessä liukurengaskoneen akselin kanssa. Oikosulkumoottori mallintaa tuulta, joka pyörittää liukurengasgeneraattorin akselia. Oikosulkumoottori kytketään ACS 800 – sarjan taajuusmuuttajaan, josta sille annetaan pyörimisohje. Taajuusmuuttajan tiedot on esitetty liitteessä 1. Taajuusmuuttajan ja oikosulkumoottorin välinen kytkentä on esitetty kuvassa 4. Oikosulkumoottoria kytkettäessä tulee huomioida käämien järjestys sekä syötävän jännitteen vaihejärjestys, jotta pyörimissuunta on oikea.



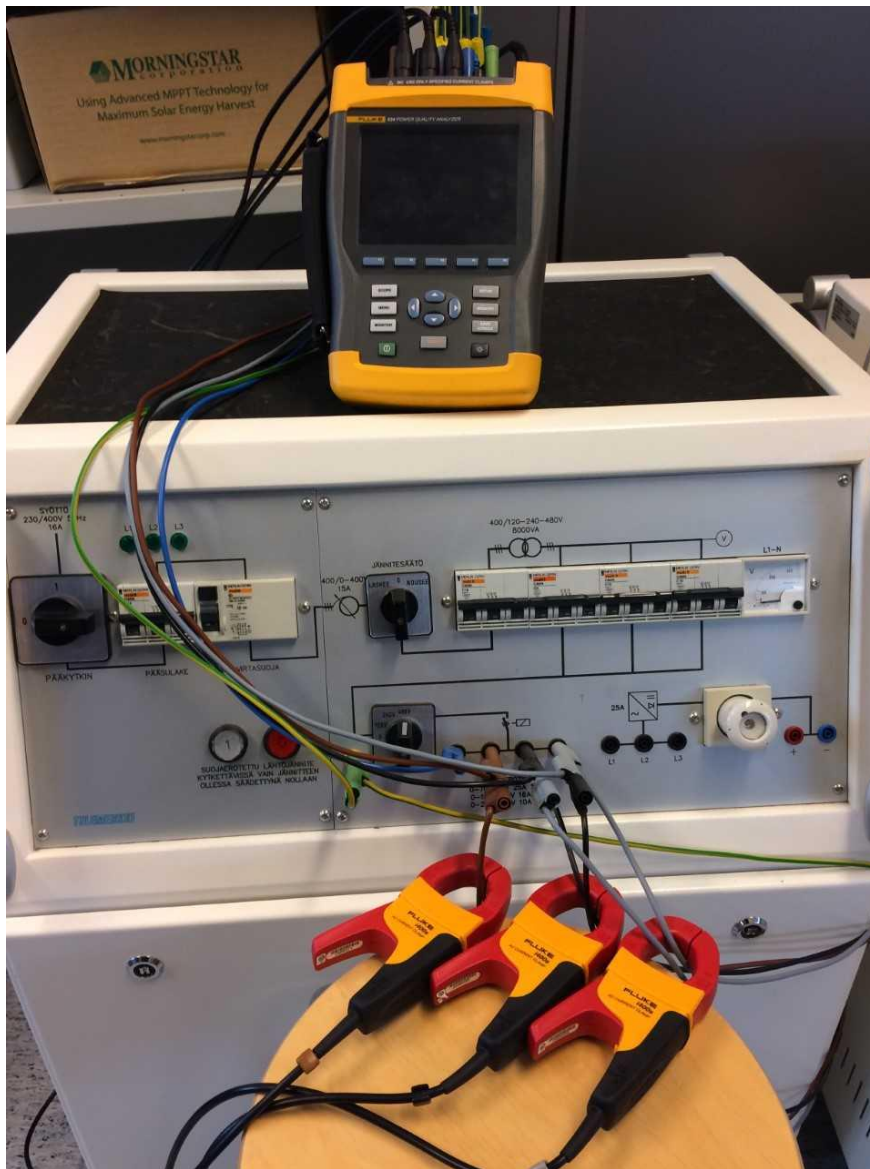
KUVA 4. Oikosulkumoottorin ja taajuusmuuttajan välinen kytkentä

Kun taajuusmuuttajan ja oikosulkumoottorin välinen kytkentä on tehty, kytketään seuraavaksi liukurengaskone verkkoon kuvan 5 mukaisesti.



KUVA 5. Liukurengaskoneen kytkeminen verkkoon

Liukurengaskone kytketään liikuteltavaan virtavaunuun, jossa on jännitteensäätömahdollisuus. Kytkeä on yksinkertainen, sillä vaihejännitteet kytketään suoraan staattorikäämien alkupäähän (U1, V1 ja W1) staattorikäämien toiset päät (W2, U2 ja V2) oikosuljetaan. Liukurengaskonetta kytkettäessä tulee huomata vaihejärjestys (L1, L3 ja L2), sillä liukurengaskoneen pyörimissuunnan tulee olla sama, kuin tuulta mallintavan oikosulkukoneen pyörimissuunnan. Myös roottorikäämit (K, L ja M) oikosuljetaan, sillä tarkoitus on juuri tutkia oikosuljettua liukurengasgeneraattoria. Kytkeä lisätään vaihejännite- ja vaihevirtamittaukset, joihin Fluke 434 – energia-analysaattori soveltuu hyvin. Virtamittausta asentaessa on tarkastettava virranmittauksen suunta virtapihdistä. Energia-analysaattoria lisättäessä on myös huomioitava, että analysaattoriin on kytkettävä nolla-johdin virtavaunulta, jotta analysaattori toimii oikein. Nollajohdin on siis lisättävä, vaikka sitä ei kytketä liukurengaskoneelle. Fluke 434 – energia-analysaattorin kytkentä näkyy kuvassa 6.



KUVA 6. Fluke 434 - energia-analysoitsattorin kytkentä

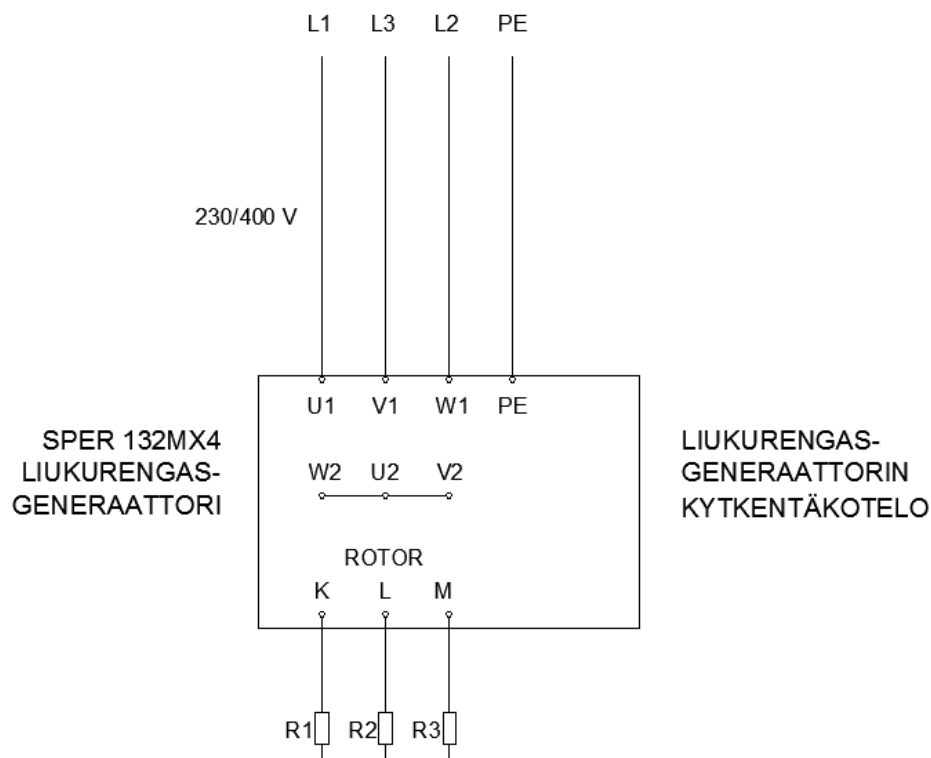
Kun myös liukurengaskoneen kytkennät on tehty, voidaan oikosulkukonetta ohjaavan taajuusmuuttajan virrat kytkeä päälle. Oikosulkukonetta ei vielä käynnistetä, vaan seuraavaksi parametroidaan taajuusmuuttaja. Taajuusmuuttajaan asetettavat parametrit löytyvät luvun 3.2 taulukosta 2. Kun taajuusmuuttaja on parametroitu, voidaan mittaukset aloittaa. Mittaukset suoritetaan seuraavassa järjestyksessä:

1. Aseta oikosulkukonetta ohjaavan taajuusmuuttajan momenttiohjeeksi 6 % ja käynnistä oikosulkukone. Mikäli oikosulkukone ei heti lähde pyörimään, pysäytä se ja käynnistä sen jälkeen uudelleen. Jos kone ei lähde vielä kukaan pyörimään, voi momenttiohjetta nostaa esimerkiksi 10 %:iin. Mikäli momenttiohje nostetaan 10 %:iin, laske se takaisin 6 %:iin koneen käynnistyttyä.

2. Kun oikosulkukone lähtee pyörimään, kytke liukurengaskoneen staattorille 230 V:n vaihejännite. Jännite syötetään liikuteltavasta virtavaunusta.
3. Mittaa liukurengaskoneen pyörimisnopeus, vaihevirratt, -jännitteet, -tehot, kokonaisteho, taajuus, sekä tehokerroin, kun momenttiohje on 6 %. (Huomaa tehonsuunta!)
4. Kun edelliset arvot on mitattu ja taulukoitu, nosta taajuusmuuttajan momenttiohje 8 %:iin ja toista kohdan 3 mittaukset.
5. Nosta momenttiohje edelleen kahden prosenttiyksikön korotuksilla aina 25 %:iin asti ja toista mittaukset.
6. Kun viimeinen mittaussarja on mitattu, laske taajuusmuuttajan momenttiohje takaisin 6 %:iin ja odota kunnes koneen nopeus tasaantuu. Tämän jälkeen kytke liukurengaskoneen staattorijännitteet pois ja pysäytä tämän jälkeen oikosulkukone.

4.2 Liukurengasgeneraattorin tutkiminen roottoriresistanssin muuttuessa

Työn toisessa vaiheessa tutkitaan liukurengaskoneen käyttäytymistä, kun roottoriin tuodaan ulkoiset vastukset. Tuulta mallintavan oikosulkukoneen kytkentä pysyy samana, kuin edellisessä mittaussarjassa, mutta liukurengaskoneen kytkentä muuttuu kuvan 7 mukaiseksi.



KUVA 7. Liukurengasgeneraattorin kytkentä roottoriresistansseilla

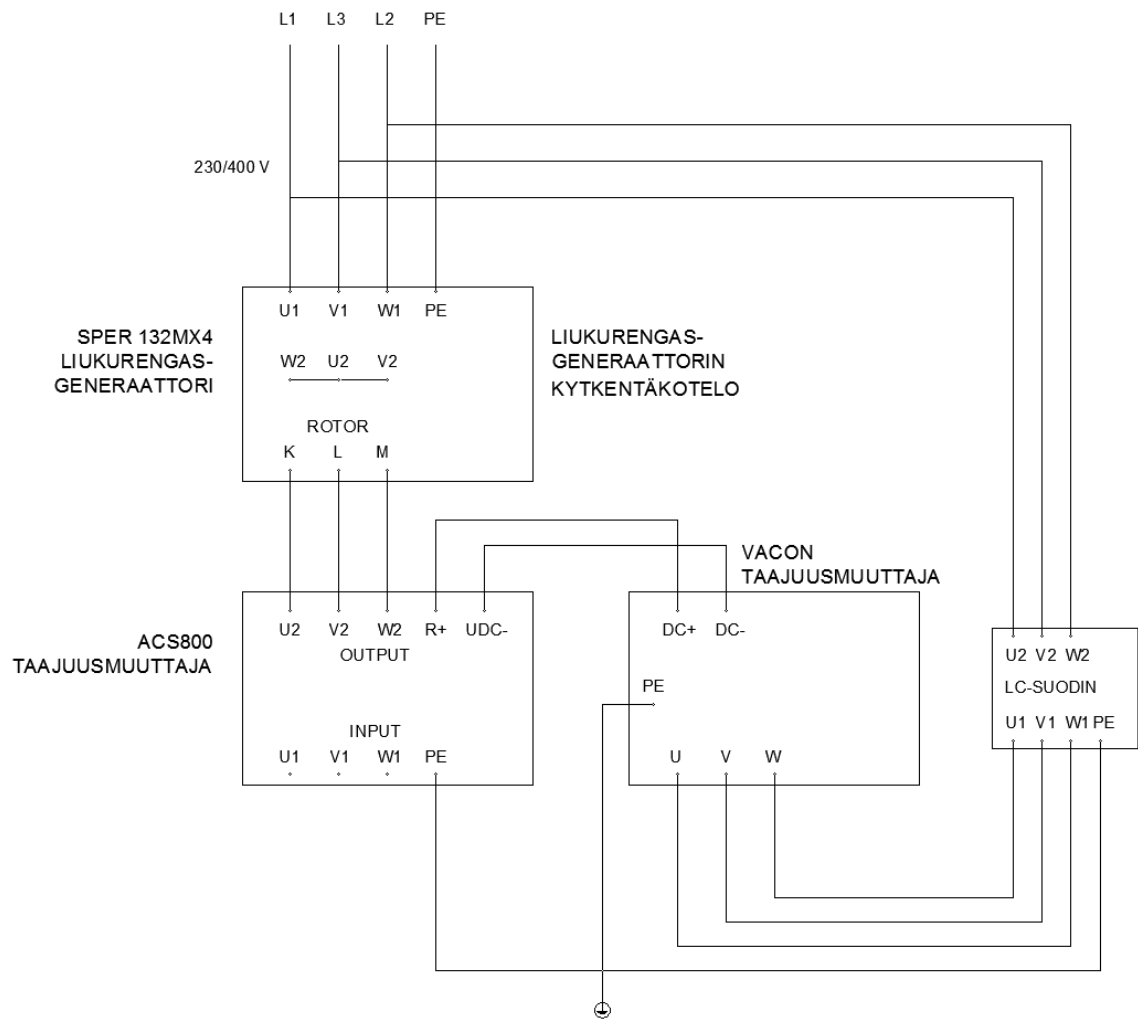
Roottoriin lisätään säädettävä kolmivaihevastus, jonka toiset päät kytketään yhteen. Vastuksiin lisätään myös vaihejännitteen ja vaihevirran mittaukset, joilla saadaan laskettua vastuksissa tapahtuvat tehohäviöt. Mittauksissa käytettävä kolmivaihevastus mittareineen näkyy liitteessä 2. Kun kytkentämuutokset on tehty, suoritetaan mittaukset seuraavasti:

1. Aseta oikosulkukonetta ohjaavaan taajuusmuuttajaan momenttiohjeeiksi 6 % ja käynnistä oikosulkukone. Varmista, että vastusten resistanssit ovat 0 ohmia.
2. Kun oikosulkukone lähtee pyörimään, kytke liukurengaskoneen staattorille 230 V:n vaihejännite.

3. Mittaa liukurengaskoneen pyörimisnopeus, vaihevirratt, -jännitteet, -tehot, kokonaisteho, taajuus, sekä tehokerroin. Muista mitata myös vastuksissa tapahtuvat tehohäviöt.
4. Kun edelliset arvot on mitattu ja taulukoitu, nosta resistanssi 0,35 ohmiin, mutta pidä momenttiohje edelleen samana. Toista mittaukset.
5. Nosta resistanssi edelleen 0,7 ohmiin, lopulta saavuttaen 5,1 ohmin rajan. Kun kaikki vastuksen arvot on käyty läpi, nosta momenttiohje 10 %:iin ja toista mittaukset kaikilla vastusten arvoilla. Tämän jälkeen nosta jälleen momenttiohjetta portaittain aina 25 %:iin asti ja toista mittaukset kaikilla vastusten 0-5,1 ohmin arvoilla.
6. Kun viimeinen mittaussarja on mitattu, laske taajuusmuuttajan momenttiohje takaisin 6 %:iin ja odota koneen nopeuden tasautumista. Tämän jälkeen kytke liukurengaskoneen staattorijännitteet pois ja pysäytä oikosulkukone.

4.3 Liukurengasgeneraattorin tutkiminen kaksoissyötettynä

Laboratoriotyön viimeisessä vaiheessa tutkitaan liukurengasgeneraattoria tilanteessa, jossa liukurengasgeneraattoria käytetään osana DFIG – kokonaisuutta. Työn tarkoituksena on havainnollistaa, kuinka kaksoissyötetyllä rajoitetusti muuttuvanopeuksisella tuulivoimalakäytöllä saadaan hyödynnettyä tuulen korkeammatkin nopeudet. Mittauksia varten liukurengaskoneen kytkentää muutetaan jälleen, mutta tuulta mallintavan oikosulkumoottorin kytkentä pysyy edelleen samana kuin kuvassa 4. Kaksoissyötetyn liukurengaskoneen kytkentä on esitetty kuvassa 8.



KUVA 8. Liukurengaskoneen kytkentä kaksoissyötettynä

Myös tässä kytkennässä liukurengaskoneen staattori kytketään suoraan verkkoon, mutta roottoriin kytkentä muuttuu huomattavasti. Tällä kertaa liukurengaskoneen roottoriin kytketään ACS 800 – taajuusmuuttaja. Kyseisen ACS 800 – taajuusmuuttajan tiedot on esitetty liitteessä 3. Tämän taajuusmuuttajan jännitevälipiiriin kytketään pienemtehoinen Vacon NXI – sarjan taajuusmuuttaja, jonka tiedot on esitetty liitteessä 4. Vacon NXI-taajuusmuuttaja kytketään LC-suotimen kautta takaisin verkkoon. LC-suotimen tyyppi on esitetty liitteessä 5. Kytkentää muutettaessa on syytä huomata, että LC-suotimelta verkkoon tulevat johtimet tulee lisätä energia-analysaattorin virtamittaukseen. Kun kuvan 8 mukainen kytkentä on tehty, tulee vielä roottoriin ACS 800-taajuusmuuttaja parametroida. Tärkeimmät aseteltavat parametrit on esitetty taulukossa 7.

TAULUKKO 7. Roottoripiiriin kytketyn taajuusmuuttajaan aseteltavat parametrit

parametri	valittu nimi/arvo
10.1	DI1,2
10.2	ei valittu
10.3	eteen
11.1	REF 1 (rpm)
11.2	ULK1
11.3	PANELI
16.1	ei
16.2	avoin
20.3	26,5 A
20.4	300 %
20.5	päällä
20.6	päällä
20.7	-50 Hz
20.8	55 Hz
20.11	300 %
20.12	-300 %
27.1	käytössä
27.2	ei
27.3	100 ohm
27.4	0 s
27.5	0 kW
27.6	common DC
99.1	suomi
99.2	tehdas
99.3	ei
99.4	skalaari
99.5	250 V
99.6	24,5 A
99.7	75 Hz
99.8	1450 rpm
99.9	5,5 kW
99.10	ID MAGN

Kun kytkennät on tehty ja tarkastettu, suoritetaan mittaukset seuraavassa järjestyksessä:

1. Aseta oikosulkukonetta ohjaavaan taajuusmuuttajaan momenttiohjeeksi tällä keralla 7 % ja käynnistä oikosulkukone.
2. Kun oikosulkukone lähtee pyörimään, kytke staattorijännitteet ja laske momenttiohjetta pienentämällä pyörimisnopeus lähelle 1500 rpm (n. 2,5 %).
3. Käynnistä tämän jälkeen Vacon NXI-taajuusmuuttaja ja heti perään taajuusmuuttaja, jolla syötetään roottoripiiriin jännitettä. Varmista, että roottoripiiriin syötetävän jännitteen taajuus on tässä vaiheessa vielä 0 Hz.

4. Kun taajuusmuuttajat on käynnistetty, nosta tuulta mallintavan oikosulkukoneen momenttiohje 6 %:iin.
5. Mittaa liukurengaskoneen pyörimisnopeus, vaihevirratt, -jännitteet, -tehot, kokonaisteho, taajuus, sekä tehokerroin.
6. Kun edelliset arvot on mitattu ja taulukoitu, nosta roottorille syötettävän jännitteen taajuutta 5 Hz:iin, mutta pidä momenttiohje edelleen samana. Toista mittaukset.
7. Nosta taajuutta edelleen 7,5 Hz:iin ja tämän jälkeen 10, 12,5 ja 15 Hz:iin. Kun taajuudet 0-15 Hz on käyty läpi, nosta momenttiohje 10 %:iin ja toista mittaukset kaikilla taajuuksilla. Tämän jälkeen nosta jälleen momenttiohjetta portaittain aina 20 %:iin asti.
8. Kun viimeinen mittaussarja on mitattu, laske taajuusmuuttajan momenttiohje takaisin 6 %:iin ja odota kunnes koneen nopeus tasaantuu. Tämän jälkeen kytke liukurengaskoneen staattorijännitteet pois ja pysäytä tämän jälkeen oikosulkukone.

5 POHDINTA

Opinnäytetyön tarkoituksena oli rakentaa Tampereen ammattikorkeakoulun sähkövoimatekniikanlaboratorioon mittausympäristö, jossa opiskelijat voivat tutkia liukurengasgeneraattorin toimintaa ja käyttöä tuulivoimalassa, erilaisissa käyttötilanteissa. Työn tavoitteena oli myös tehdä mittaussarja, jossa eri käyttötilanteet simuloidaan.

Laboratoriotyön ensimmäinen osa, jossa liukurengaskonetta tutkittiin roottoriipiiri oikosuljettuna, saatiin helposti toimimaan ja generaattori saatiin tuottamaan sähköä. Suurimmat vaikeudet tulivat vastaan taajuusmuuttajaa parametroidessa, mutta ongelmiin saatiin ratkaisut erilaisia parametreja testaamalla. Laboratoriotyön toinen osa ei myöskään tuottanut ongelmia, sillä tässä osassa liukurengasgeneraattorin roottoriipiiriin lisättiin vain ulkoiset vastukset. Työn viimeinen osa tuotti kuitenkin haasteita, sillä roottoriipiiriin lisätty taajuusmuuttaja ei aluksi toiminut halutulla tavalla. Taajuusmuuttaja antoi vikakoodin aina käynnistettäessä järjestelmää. Vikakoodista ilmeni, että taajuusmuuttajan jännitevälipiirissä oli ylivirtaa. Nämä ongelmat saatiin aluksi korjattua vastuksella, joka kytkettiin taajuusmuuttajan jännitevälipiiriin. Myöhemmässä vaiheessa vastus korvattiin toisella taajuusmuuttajalla, jonka avulla jännitevälipiirin häviöt ohjattiin takaisin syöttävään verkkoon, eikä näin syntynyt ylimääräisiä tehohäviöitä.

Opinnäytetyö onnistui kokonaisuudessa hyvin, sillä sen avulla saatiin rakennettua sähkövoimatekniikan laboratorioon toimiva mittausympäristö. Lisäksi opinnäytetyössä saatiin laadittua selkeä laboratoriotyöohje, jonka avulla opiskelijat voivat tutkia liukurengasgeneraattorin toimintaa.

LÄHTEET

ABB, 2001. Tekninen opas nro 7, Sähkökäytön mitoitus, Päivitetty 16.5.2003. Luettu 30.3.2017

https://library.e.abb.com/public/b11d4fe92973be93c1256d2800415027/Tekninen_opasnro7.pdf

ABB, 2011. ACS 800, Ohjelmointiopas, ACS 800 Vakio-ohjausohjelmisto 7.x. Versiopäivämäärä: 25.8.2011

Ackermann, T. 2005. Wind Power in Power Systems. 1. painos. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.

Hietalahti, L. 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. 1.painos. Tampere: Amk-kustannus Oy Tammertekniikka

Hietalahti, L. 2013. Teollisuuden sähkökäytöt. 1.painos. Tampere: Amk-kustannus Oy Tammertekniikka

Korpela, A. 2016. Tuulivoima perusteet. 1.painos. Tampere: Amk-kustannus Oy Tammertekniikka

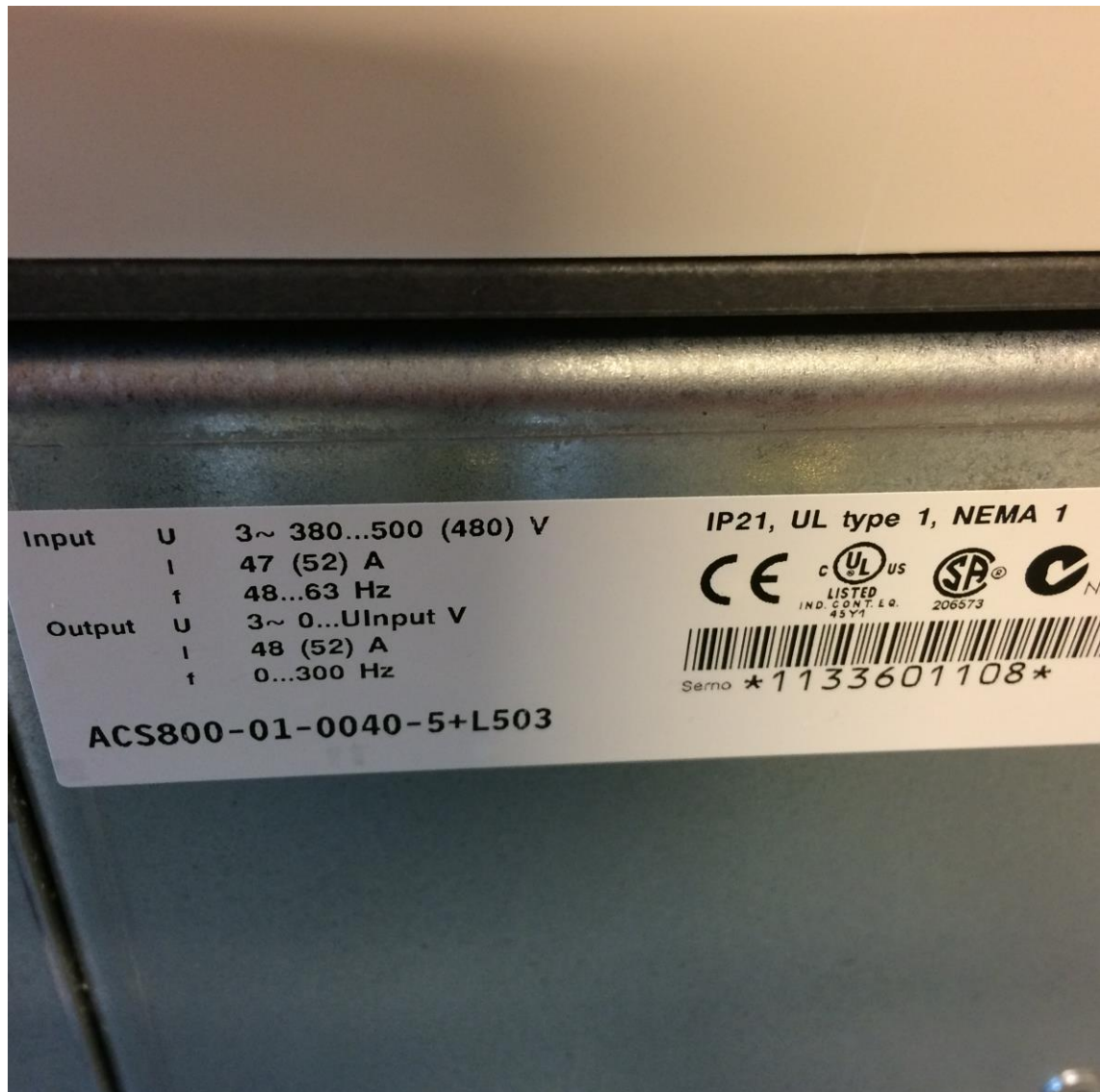
Korpinen, L. 1998a. Sähkökoneet, osa 1. Julkaistu 14.10.1998. Luettu 30.03.2017. http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf

Kärnä, J. & Saransaari, P. 1978. Tehoelektroniikka. Espoo: Otakustantamo

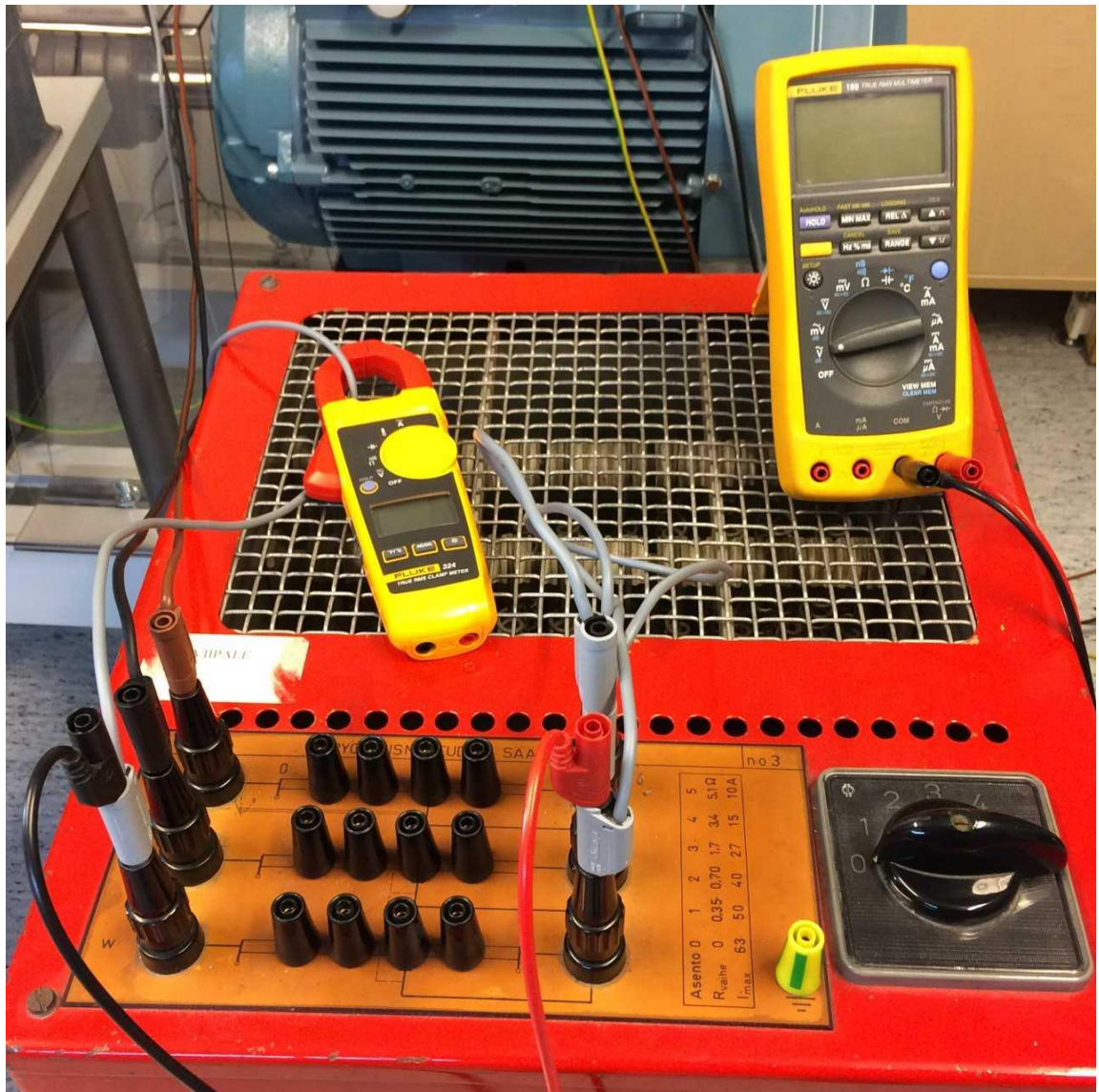
Paavola, M. & Lehtinen, P. 1982. Sähkötekniikan oppikirja. 15.painos. Porvoo. WSOY

LIITTEET

Liite 1. Tuulta mallintavaa oikosulkumoottoria ohjaavan taajuusmuuttajan kilpiarvot



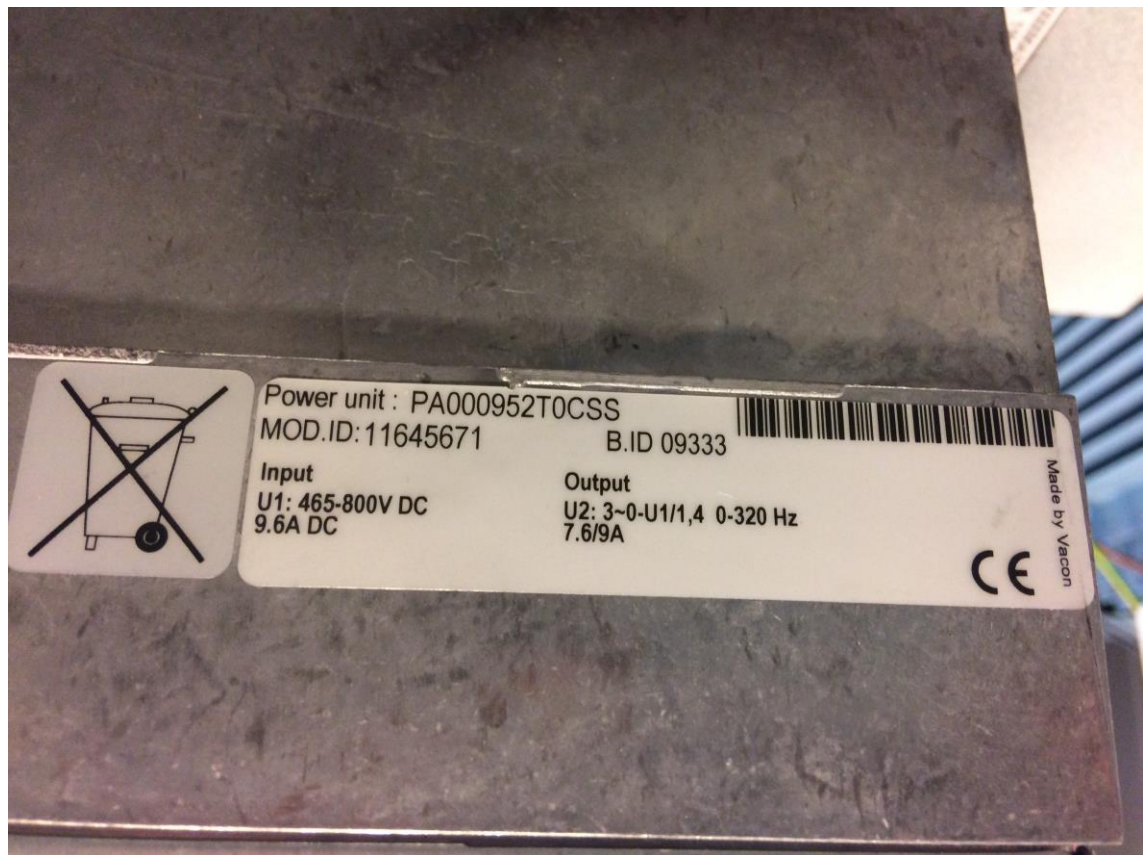
Liite 2. Mittauksissa käytetty kolmivaihevastus ja tehohäviöiden mittaamiseen käytettävät mittalaitteet



Liite 3. Roottoripiiriin kytketyn ACS 800 – taajuusmuuttajan tiedot



Liite 4. Vacon NXI – taajuusmuuttajan tiedot



Liite 5. LC-suotimen tiedot

