



SIIRRETTÄVÄN 1-VAIHEISEN VA- RAVOIMALAITTEEN KÄYTTÖ- TURVALLISUUS

Satu Saarinen

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2014
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikka

SAARINEN, SATU:

Siirrettävän 1-vaiheisen varavoimalaitteen käyttöturvallisuus

Opinnäytetyö 75 sivua, joista liitteitä 15 sivua
Huhtikuu 2014

Vuoden 2011 joulunajan myrskyt käynnistivät keskustelun sähkönsiirron toimitusvarmuudesta, ja sähkökatkoihin varautuminen alkoi kiinnostaa myös kotitalouksia. Kuluttajat hankkivat omaa varavoimaa turvatakseen tärkeimmät sähkökäyttökohteensa. Varavoiman käyttöön voi kuitenkin liittyä sähköturvallisuusriski, jos laitteisto asennetaan tai sitä käytetään väärin.

Opinnäytetyössä tutkittiin yksivaiheisen siirrettävän varavoimalaitteen käyttöturvallisuutta. Aggregaatille suoritettiin erilaisia mittauksia, joilla pyrittiin mallintamaan tyypillisiä kuluttajakäytössä esiintyviä tilanteita. Mittauksia tehtiin sekä aggregaatti maadoitettuna että ilman maadoitusta. Työn taustalla oli varavoimaa ja sen käyttöturvallisuutta koskeva tutkimus, jonka tavoitteena oli parantaa yhteiskunnan turvallista varautumista sähkökatkoihin. Tutkimustyö toteutettiin yhteistyössä Tampereen teknillisen yliopiston ja Tampereen ammattikorkeakoulun kanssa.

Mittauksissa ei esiintynyt henkilöturvallisuuteen liittyviä riskejä, mutta aggregaatin tuottaman sähkön laatu ei täyttänyt standardin SFS-EN 50160 Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet vaatimuksia jokaisessa mittauksessa. Mittaustulosten perusteella voidaan kyseenalaistaa laitteen soveltuvuus herkkien elektroniikkalaitteiden sähkön syöttöön.

Kuluttajia tulisi ohjeistaa sopivan varavoimalaitteiston valintaan ja varavoimalaitteen turvalliseen käyttöön. Ongelmia esiintyy usein varavoimalaitteen mitoittamisessa, jossa tulee huomioida kokonaistehotarpeen lisäksi muun muassa kuormituksen käyttäytyminen. Varavoimalaitetta hankkiessa on myös tärkeää selvittää käyttökohteet, joiden syöttöön laite soveltuu. Tulevaisuudessa varavoimalaitteistojen käyttö kotitalouksissa tulee lisääntymään. Mahdollisuus varavoimalaitteen liittämistä kiinteään asennukseen olisi hyvä ottaa huomioon jo suunniteltaessa kiinteistön sähköjärjestelmää.

ABSTRACT

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

SAARINEN, SATU:
Safety of a Single-Phase Backup Generator

Bachelor's thesis 75 pages, appendices 15 pages
April 2014

The Christmas season storms in 2011 started a debate on security of electricity supply. Households became interested in preparing for the power outages and many people acquired their own reserve power in order to ensure the supply of electricity. However, there can be an electrical hazard in using reserve power if the device is used incorrectly.

The purpose of this thesis was to examine the safety of a single-phase backup generator. Various measurements were carried out to the backup generator to model typical situations in consumer use. Measurements were taken both generator with and without ground connection. The study was based on research of the safety of reserve power and the objective of research was to improve the society's preparation for power outages. The research was carried out in collaboration with Tampere University of Technology and Tampere University of Applied Sciences.

In measurements there were no personal safety risks. Instead the quality of the electricity generated by the backup generator did not meet the requirements of the standard SFS-EN 50160 Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks in every measurement. Based on the measurement data, the suitability of the generator for supplying sensitive electronic devices can be called into question.

Instructions concerning the selection of suitable reserve power systems and safe use of backup generators should be given to consumers. Problems often occur when sizing the backup generator. In addition to the apparent power also the behavior of the load must be taken into account. It is also important to find out the uses for which the device is suitable. In the future the use of reserve power systems will increase in household use. The possibility of mounting backup generator into fixed installation would be good to take into account when designing the electrical system of the building.

Key words: reserve power, backup generator

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	AGGREGAATTI VARAVOIMAKONEENA	9
2.1	Aggregaatin yleiset ominaisuudet.....	9
2.2	Tutkittava varavoimalaite Autobil FP2500.....	10
2.3	Tahtikone	12
2.3.1	Tahtikoneen mallintaminen.....	13
2.3.2	Kestomagneettitahtikone.....	15
2.4	Varavoimalaitteen varusteet	16
2.5	Varavoimageneraattori oikosulkuilanteessa	17
2.5.1	Generaattori ei syötä jatkuvaa oikosulkuvirtaa	17
2.5.2	Generaattori syöttää jatkuvaa oikosulkuvirtaa	18
2.6	Suojaus varavoimalaitteen syöttämässä sähkölaitteistossa.....	19
2.6.1	Suojaerotus varavoimalaitteen suojausmenetelmänä.....	20
2.6.2	Varavoimakoneen vikasuojaus.....	20
2.6.3	Ylivirtasuojaus varavoimakoneen syöttämässä sähkölaitteistossa	21
2.7	Varavoimalaitteen valinta ja mitoitus	21
3	JAKELUJÄRJESTELMÄT JA SÄHKÖTURVALLISUUS	23
3.1	Jakelujärjestelmät.....	23
3.1.1	TN-järjestelmät	23
3.1.2	TT-järjestelmä ja IT-järjestelmä	24
3.2	Suojausmenetelmät	25
3.2.1	Perussuojaus	26
3.2.2	Vikasuojaus	26
3.2.3	Lisäsuojaus	28
4	SÄHKÖN LAATU	29
4.1	Yliaallot	29
4.2	Loisteho	31
4.3	Sähkön laatuvaatimukset	33
4.3.1	Verkkotaajuus	33
4.3.2	Jakelujännitteen suuruus ja jännitetason vaihtelut	33
4.3.3	Jännitteen muutokset ja välkynnän häiritsevyysindeksi	34
4.3.4	Jakelujännitteen epäsymmetria	35
4.3.5	Harmoninen ja epäharmoninen yliaaltojännite	35
4.3.6	Transienttiylijännitteet	36
5	MITTAUKSET	37
5.1	Generaattorilaitteiston käyttöönottotarkastus	38

5.1.1	Suojajohdinpiirin jatkuvuusmittaus	39
5.1.2	Eristysresistanssimittaus	39
5.1.3	Tyhjäkäyntiajo.....	40
5.2	Kuormitusmittaukset.....	40
5.2.1	Resistiivinen kuorma.....	40
5.2.2	Induktiivinen kuorma	41
5.2.3	Kapasitiivinen kuorma	41
5.2.4	Epälineaarinen kuorma.....	41
5.2.5	Oikosulkukoe	42
5.2.6	Kuormitusmuutosmittaukset	42
5.3	Muut kuormitusmittaukset.....	43
5.3.1	Kiertovesipumput.....	43
5.3.2	Puutarhapumppu	44
5.3.3	Rakennuslämmitin	45
5.3.4	DALI-valaistuksenohjausjärjestelmä	46
5.3.5	KNX-automaatiojärjestelmä	47
6	MITTAUSTULOKSET.....	48
6.1	Generaattorilaitteiston käyttöönottotarkastukset	48
6.2	Kuormitusmittausten tulokset	49
6.2.1	Kuormituskokeiden mittaustulokset	49
6.2.2	Oikosulkukokeen mittaustulokset	53
6.2.3	Kuormitusmuutuskokeiden mittaustulokset.....	54
6.3	Muiden kuormitusmittausten tulokset	55
7	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	57
	LÄHTEET	59
	LIITTEET	61
	Liite 1. Mittauskytkennän piirikaavio 1	61
	Liite 2. Mittauskytkennän piirikaavio 2	62
	Liite 3. Mittauskytkennän piirikaavio puutarhapumpun syötössä.....	63
	Liite 4. Mittaustulokset tyhjäkäynnissä.....	64
	Liite 5. Mittaustulokset resistiivisellä kuormalla	65
	Liite 6. Mittaustulokset induktiivisella kuormalla	68
	Liite 7. Mittaustulokset kapasitiivisella kuormalla	69
	Liite 8. Mittaustulokset epälineaarisella kuormalla.....	70
	Liite 9. Mittaustuloksia kuormitusmuutoksista	72

LYHENTEET JA TERMIT

$\cos\varphi$	perusaallon tehokerroin
P	pätöteho, W
perusaalto	jännitteen tai virran perustaajuinen komponentti
perustaajuus	jakelujännitteen perusaallon taajuus, Suomessa 50 Hz
Q	loisteho, VAR
S	näennäisteho, VA
THD	harmoninen kokonaissärö (total harmonic distortion)
U_f	lähdejännite, V
U_n	nimellisjännite, V
U_s	liitinjännite, V
X_d	tahtireaktanssi, Ω
yliaalto	muu kuin perustaajuinen jännitteen tai virran komponentti

1 JOHDANTO

Sähkö on mukana meidän jokapäiväisessä elämässämme, ja sen merkitys osana yhteiskunnan arkipäivää vain kasvaa. Vuoden 2011 joulunajan myrskyt herättivät keskustelua sähkönsiirron toimitusvarmuudesta ja sähkökatkoihin varautumisesta. Tapani-myrsky 26. joulukuuta ja Hannu-myrsky 27. joulukuuta aiheuttivat suurta tuhoa, mutta erityisesti sähkökatkot olivat suurin ongelma. Sähkökatkot vaikuttivat moniin yhteiskunnan perustoimintoihin, ja tähän ei ollut osattu varautua. Energiateollisuus ry:n tekemän kyselyn mukaan myrskyjen aiheuttamista sähkökatkoista joutui kärsimään 570 000 asiakasta (Energiateollisuus ry, 2012) ja pahimmillaan sähkönjakelun keskeytykset saattoivat pitkittyä useaan viikkoon korjaustöiden laajuuden vuoksi.

Sähköverkkoyhtiöt ovat ottaneet linjakseen investoida ilmajohtojen maakaapelointiin ja sähköverkkojen rakenteen kehittämiseen. Myrskyt ovat lisänneet kuitenkin myös kotitalouksien kiinnostusta varautua sähkökatkoihin esimerkiksi oman varavoiman hankinnalla. Pitkät sähkökeskeytykset pakkasilla voivat aiheuttaa suuria taloudellisia vahinkoja käyttövesijohtojen ja lämmitysjärjestelmien jäätyessä, joten omalla varavoimalla voidaan turvata sähkön saanti ja välttyä näiltä lisävahingoilta.

Varavoimalaitteisto voidaan asentaa kiinteäksi osaksi kiinteistön sähköjärjestelmää tai se voi olla siirrettävä laitteisto. Varavoimaa voidaan toisinaan syöttää myös jakeluverkkoon esimerkiksi työkeskeytyksen aikana. Kiinteään asennukseen liittäminen vaatii usein muutostöitä kiinteissä sähköasennuksissa, joita saa tehdä vain sähköalan ammattilainen. Siirrettävän ratkaisun käyttöönotto ei kuitenkaan vaadi asiantuntijan läsnäoloa, joten asennuksessa on harvoin mukana ammattihenkilö. Väärin asennettuna ja käytettynä varavoimalaitteen käyttö voi olla sähköturvallisuusriski. Varavoiman käytössä ja liittämässä onkin erilaisia tapoja, jotka täytyy ottaa huomioon, jotta välttyttäisiin näiltä riskeiltä. Aggregaatteja käyttävät usein henkilöt, joilla ei ole tarvittavia tietoja aggregaattien turvallisesta käytöstä. Myyjän velvollisuus olisi antaa tietoa laitteen käytöstä, mutta kuluttajan pitäisi olla itse tietoinen siitä miten ja millaiseen ympäristöön aggregaatti liitetään. (Pakonen & Verho 2013)

Tässä työssä keskitytään 1-vaiheisen siirrettävän varavoimalaitteen käyttöturvallisuuden tarkasteluun. Opinnäytetyön taustalla on tutkimus varavoimasta ja sen sähköturvallisuus-

desta. Projektin tavoitteena on parantaa varavoiman käyttöturvallisuutta ja yhteiskunnan varautumista sähkökatkoihin. Käytännön mittauksilla on tarkoitus simuloida tyypillisiä varavoiman käyttötilanteita ja selvittää varavoimakäyttöön liittyviä sähköturvallisuusriskejä ottaen huomioon sekä henkilö- että laiteturvallisuuden näkökulman. Tutkimustyön toteuttavat yhteistyössä Tampereen teknillinen yliopisto TTY ja Tampereen ammattikorkeakoulu TAMK. Rahoittajina ovat ST-Pooli, Sähköturvallisuuden edistämiskeskus STEK ja Huoltovarmuuskeskus. Tutkimus toteutetaan aikavälillä 1.6.2012–31.1.2014 kolmessa eri vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa kartoitetaan erilaisten varavoimalaitteiden ja -ratkaisujen yleisyyttä sekä käyttösuunnitelmia ja -tapoja, ja toinen vaihe keskittyy varavoiman käyttöön liittyvien sähköturvallisuusriskien selvittämiseen. Tutkimuksen viimeisessä vaiheessa dokumentoidaan tutkimuksen tulokset ja laaditaan kuluttajalle tai kiinteistön edustajalle suosituksia ja ohjeita varavoiman käytöstä ja verkkoon kytkemisestä sähköturvallisuuden parantamiseksi. Tarkoituksena on myös luoda täydentävää ohjeistusta jo olemassa olevien materiaalien lisäksi. (Pakonen & Verho 2013)

2 AGGREGAATTI VARAVOIMAKONEENA

Aggregaatti tarkoittaa polttomoottorin ja sähkögeneraattorin yhdistelmää, jolla voidaan tuottaa sähköä tilanteissa, joissa sähköä ei ole saatavilla jakeluverkosta. Aggregaatin generaattori saa käyttövoimansa joko kiinteästä moottorista tai traktorin voimauulosotosta. Laitteen käyttö voidaan jakaa seuraaviin tilanteisiin: tilapäisten rakennelmien syöttöön, pysyvien rakennusten syöttöön, kun niitä ei ole liitetty yleiseen jakeluverkkoon, siirrettävien laitteiden syöttöön ja varavoimaksi korvaamaan vakituinen sähkönsyöttö. Käyttökohteita voivat olla esimerkiksi omakotitalot, maatilat, sairaalat ja kaupat. Varavoimakoneen koko vaihtelee yleensä muutaman kVA:n ja muutaman kymmenen kVA:n välillä. (STEK)

2.1 Aggregaatin yleiset ominaisuudet

ST-kortti 52.40 Siirrettävän, pienjännitteisen moottorigeneraattorin liittäminen sähkölaitteistoon käsittelee moottorigeneraattoreiden käyttöä sekä antaa ohjeita laitteiden valmistajille ja käyttäjille laitteiston valinnasta, liittämisestä ja huollosta. ST-kortissa pieni aggregaatti määritellään enintään 5 kVA:n yksivaiheiseksi bensiini- tai dieselmoottorikäyttöiseksi laitteeksi. Standardin mukaan aggregaatit voidaan jakaa ryhmiin erilaisten ominaisuuksien perusteella:

- aggregaatin vaiheluku
- synkroniset (tahti-) ja asynkroniset (epätahti-) generaattorit
- moottori- ja traktorikäyttöiset
- bensiini- ja dieselmoottorikäyttöiset
- oikosulkuvirtaa syöttävät ja syöttämättömät generaattorit
- soveltuvuus eri kuormituksille
- sisä- ja ulkokäyttöön sopivat
- käytössä olevat suojalaitteet. (ST 52.40 2012)

Generaattori voi olla rakenteeltaan synkroninen eli tahtikone tai asynkroninen eli epätahtikone. Asynkroniset generaattorit ovat rakenteeltaan yksinkertaisia, ja niitä käy-

tään lähinnä resistiivisten kuormien sähkösyöttöön. Synkroninen generaattori puolestaan sopii yleiskäyttöön. (ST 52.40 2012)

Käytettäessä aggregaattia kiinteistön sähköverkon syöttöön, kiinteään asennukseen joudutaan usein tekemään muutoksia. Näillä toimilla pyritään estämään aggregaatin rinnankäyttö jakeluverkon kanssa sekä pyritään varmistamaan aggregaatin ja kiinteän asennuksen yhteensopivuus, luotettava erotus jakeluverkkoon päin ja aggregaatin suoja-laitteiden toiminta. (ST 52.40 2012)

Moottorigeneraattoreiden syöttämien sähköasennusten suojaus poikkeaa tavallisista suojaustavoista. Useimmiten sähköinen suojaus perustuu TN-S -järjestelmän maasulkutai vikavirtaan, joten ongelmia syntyy syötettäessä TN-C- tai TN-C-S -laitteistoa, jossa ei ole erillistä PE-johdinta. Jos kiinteässä asennuksessa on käytössä nollauksia, PEN-johdin tai N- ja PE-piirien eriyttämiskappale, laitteiston normaali käyttö vaatii asennusmuutoksia. (ST 52.40 2012)

2.2 Tutkittava varavoimalaite Autobil FP2500

Työssä tutkitaan Autobil FP2500 -aggregaattia (kuva 1), jonka tekniset tiedot on esitetty taulukossa 1. Käyttöohjeen mukaan laite soveltuu koti- ja matkailukäyttöön, ja sillä voidaan tuottaa varavoimaa muun muassa valaisimille, kodinkoneille ja elektroniikkalaitteille. Varavoimakoneen nimellisteho on 2,0 kW ja enimmäisteho 2,2 kW. Aggregaatin antama ulostulojännite on 230 V ja taajuus 50 Hz. Moottori käyttää polttoaineenaan pienmoottoribensiiniä ja aggregaatin kotelointiluokka on IP23 eli se on sateenkestävä. Laitteessa on jännitemittari ja kaksi AC-sähköpistorasiaa, joiden syöttämiä virtapiirejä suojaa aggregaatin ylikuormitussuojana toimiva sulake. Laitteen maahantuoja ja jälleenmyyjä on Verkkokauppa.com Oy.



KUVA 1. Autobil FP2500 -aggregaatti (FP2500 Aggregaatin käyttöohje)

TAULUKKO 1. Aggregaatin tekniset tiedot (FP2500 Aggregaatin käyttöohje)

AC-lähtöjännite	230V~50Hz
Nimellisteho	2000W
Enimmäisteho	2200W
Malli	168F
Iskutilavuus	163 cc
Enimmäisteho (hevosvoimat / kierros)	5.5 HV / 3600 rpm
Polttoainesäiliö	15 L
Polttaine	Pienmoottoribensiini
Moottorin tyyppi	Yksisylinterinen, ilmajäähdytetty, nelitahti, OHV
Moottorin käyntiaika	10,6 tuntia
Moottoriöljy	Nelitahtiöljy (esim. SAE15W40)
Käyntiääni (7M)	65 dB (A)
Koneen paino	36 kg
Koko	620 x 450 x 480 mm

Käyttöohjeessa neuvotaan käyttäjää laitteen turvalliseen käyttöön ja korostetaan jättämään sähköasennustyöt ja vaativat huoltotoimenpiteet ammattilaisen tai valtuutetun huoltohenkilökunnan tehtäväksi. Käyttäjää opastetaan asianmukaisesti myös aggregaatin huoltoon ja ylläpitoon. Aggregaatin enimmäistehoksi kerrotaan 2,2 kW, mutta ohjeissa on myös ristiriitainen maininta, ettei kuormitus saisi ylittää aggregaatin nimellistä tehoa (2,0 kW). Hetkellisen enimmäistehon käyttöaikaan ei ole otettu kantaa.

Maadoitetussa ympäristössä aggregaatti neuvotaan suojamaadoittamaan samaan maapotentiaaliin poikkipinta-alaltaan vähintään 3,5 mm²:n maadoitusjohdolla. Käyttöohjeissa on kuva maadoituksen tekoa varten (kuva 2), mutta sähkötekniikkaan perehtymättömälle henkilölle tämä ei ole välttämättä riittävä ohje oikeanlaiseen ja turvalliseen maadoituksen tekoon.

Fig. A

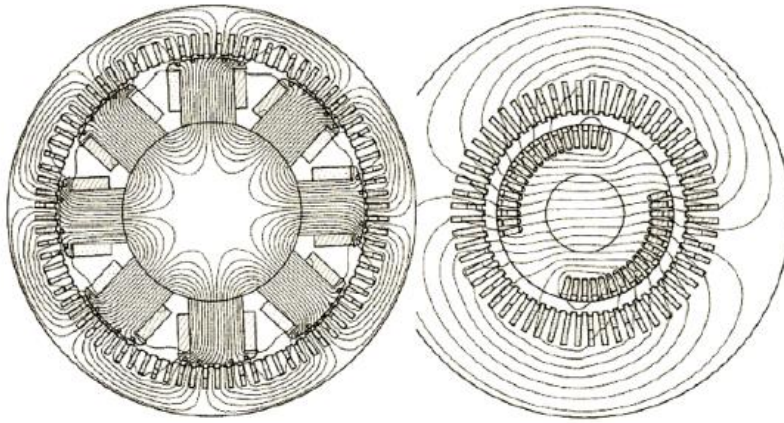


KUVVA 2. Aggregaatin maadoitus (FP2500 Aggregaatin käyttöohje)

2.3 Tahtikone

Tutkittavan aggregaatin generaattorin oletettiin olevan tahtikone eli synkronikone, joka on yleisin generaattorina käytetty pyörivä sähkökone. Tahtikoneita käytetään suurina moottoreina, mutta usein niitä käytetään tahtigeneraattoreina sähkön tuotantoon. Tahtigeneraattori muuttaa voimakoneen antaman mekaanisen tehon sähkötehoksi, joka luovutetaan sähköverkkoon. Varavoimalaitteissa voimakoneena toimii diesel- tai bensiini-moottori. (Aura & Tonteri 2005, 344 - 345)

Tahtikone on vaihtosähkökone, jonka roottori eli pyörijä pyörii staattorin eli seisijan synnyttämän pyörivän magneettikentän kanssa samalla nopeudella eli tahdissa. Tahtikoneet voidaan jakaa roottorin magneettivuon synnyttämistavan mukaan vierasmagneetoituihin tahtikoneisiin, kestmagneettitahtikoneisiin ja reluktanssitahdikoneisiin. Vierasmagnetoidussa tahtikoneessa rautalevystä tehdyn staattorin urissa on kolmivaiheinen staattorikäänitys, ja roottori käänityksineen sijaitsee staattorin sisällä. Roottorissa on tasasähkölähteellä magnetoitu naparakenne. Tahtikoneet jaetaan kahteen konetyyppiin niiden roottorin eli napapyörän rakenteen mukaan: umpi- ja avonapakoneisiin (kuva 3).



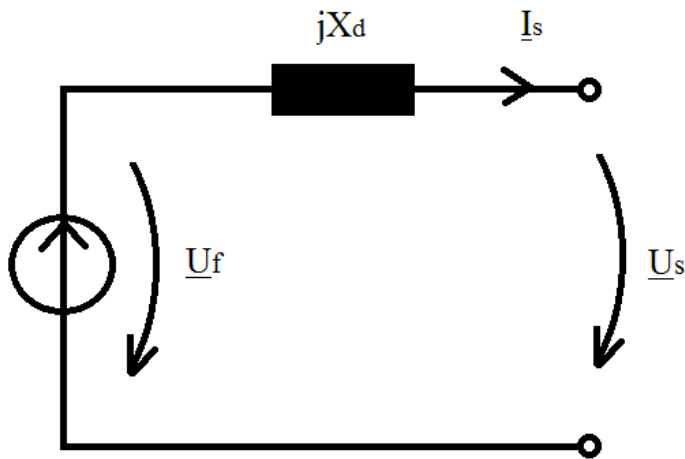
KUVA 3. Avo- ja umpinapaisen tahtikoneen poikkileikkaus (Hietalahti 2011, 87)

Umpinaparoottori on sylinterimäinen ja magnetointikäänitys on sijoitettu roottorin akselin suuntaisiin uriin. Avonapakoneessa roottori koostuu magneettinavoista, niin sanotuista avonavoista, joiden ympärille magnetointikäänitys on käämitty. Nopeakäyntisissä tahtikoneissa käytetään umpinapapyörää ja hitaasti pyörivissä koneissa avonaparakenetta. (Hietalahti 2011, 87; Aura & Tonteri 2005, 344)

Tahtikoneen roottori voidaan toteuttaa myös ilman magnetointikäänitystä, jolloin kyseessä on reluktanssikone. Kestomagnetoidun tahtikoneen toiminta puolestaan eroaa erillismagnetoidusta tahtikoneesta siten, että roottorin vuo synnytetään roottoriin asennettujen kestmagneettien avulla ulkoisen teholähteen ja magnetointikäänitysten sijaan. Tässä työssä tutkittavan sähkögeneraattorin oletettiin olevan kestmagneetoitu tahtikone.

2.3.1 Tahtikoneen mallintaminen

Tahtikone voidaan yksinkertaisimmillaan mallintaa kuvan 4 mukaisella yksivaiheisella Theveninin sijaiskytkennällä, jossa jännitelähteenä on magnetoinnista riippuva induoituva lähdejännite \underline{U}_f , sarjaimpedanssina tahtireaktanssi \underline{X}_d ja liitinjännite \underline{U}_s .



KUVA 4. Tahtikoneen mallintaminen generaattorikäytössä (Hietalahti 2012, 67)

Liitinjännitteen suuruus riippuu lähdejännitteen lisäksi kuormitusvirrasta I_s , joka synnyttää tahtikoneen sisäisessä impedanssissa jännitehäviön. Sijaiskytkennän mukaan liitinjännite muodostuu generaattorikäytössä seuraavasti

$$\underline{U}_s = \underline{U}_f - jX_d \cdot \underline{I}_s \quad (1)$$

jossa

\underline{U}_s on liitinjännite [V],

\underline{U}_f on indusoitunut lähdejännite [V],

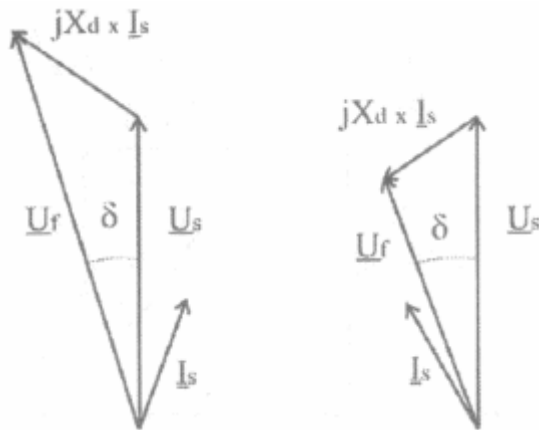
X_d tahtireaktanssi [Ω],

I_s on kuormitusvirta [A].

Vierasmagnetoidussa tahtigeneraattorissa liitinjännite U_s on pyörimisnopeuden n , magnetoimisvirran I_m ja kuormitusvirran I_s funktio. Kuormitusvirta vaihtelee kuormituksen mukaan ja pyörimisnopeus vakioidaan taajuussäädön avulla, jolloin jännitteensäätö suoritetaan magnetoimisvirran avulla. Kestomagneettitahtikoneessa sen sijaan ei ole erillistä magnetoitikkäämitystä, vaan roottorin kestopagneetit magnetoivat koneen, jolloin magnetointi on vakio eikä sitä voida säätää samalla tavalla kuin erillismagnetoidun tahtikoneen yhteydessä. Generaattorikäytössä staattoriin indusoituneen jännitteen suuruus riippuu tällöin roottorin pyörimisnopeudesta. (Mörsky & Mörsky 1994, 70)

Tyhjäkäyvässä tahtigeneraattorissa sähkömotorinen voima E ja napajännite U_s ovat yhtä suuret. Kuormitettaessa generaattoria staattorin kuormitusvirta vaikuttaa magnetointivuohon ja napajännite U_s muuttuu ilman magnetoinnin säätöä. Kuvassa 5 on esitetty

osoitinpiirros, josta selviää generaattorin liitinjännitteen muodostuminen induktiivisella ja kapasitiivisella kuormituksella. (Mörsky & Mörsky 1994, 66; Hietalahti 2012, 90)

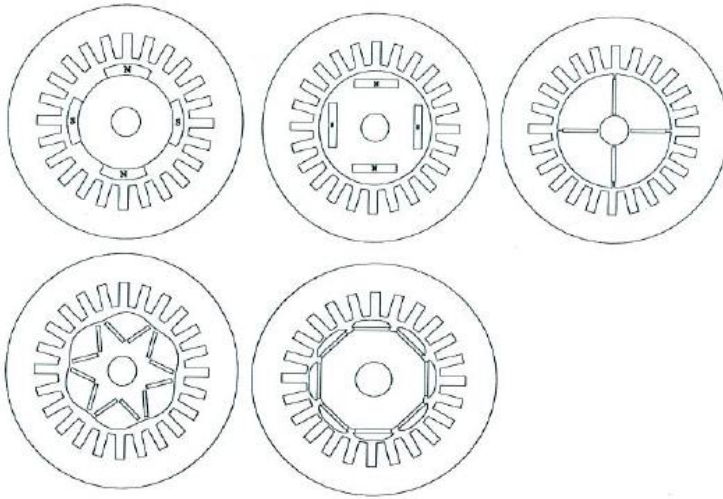


KUVA 5. Liitinjännitteen muodostuminen induktiivisellä (vasen kuva) ja kapasitiivisellä kuormituksella (oikea kuva) (Hietalahti 2012, 67)

Kuten kuvasta 5 nähdään, kestopagneettitahtikoneessa induktiivisellä kuormituksella liitinjännite U_s on lähdejännitettä U_f pienempi, kun puolestaan kapasitiivisellä kuormituksella liitinjännite on lähdejännitettä suurempi.

2.3.2 Kestomagneettitahtikone

Kestomagneettitahtikoneen staattori koostuu dynamolevystä rakennetusta levypaketista, jossa on urat staattorikäänitystä varten. Roottori voidaan toteuttaa monella eri tavalla. Sen rakenne, kestopagneettien sijainti ja kestopagneettimateriaalin määrä vaikuttavat kestopagneettikoneen ominaisuuksiin. Nykyaikaisilla voimakkailla kestopagneettimateriaaleilla roottori voidaan rakentaa jopa ilma rautaa, mutta rautaosia käytetään usein kuitenkin kestopagneettimateriaalin säästämiseksi. Roottori voidaan rakentaa levyrakenteisena tai massiiviosista, jolloin magneetit liimataan roottorin pinnalle. Kuvassa 6 on esitetty erilaisia kestopagneettitahtikoneen levyroottorirakenteita. Kestomagneetit voidaan kiinnittää joko roottorin pintaan, kuten kuvassa 6 ylärivin vasemmalla olevassa roottorissa, tai upottaa roottorin sisään, kuten kuvassa 6 ylärivin keskimmäisessä roottorissa. (Hietalahti 2012, 71)



KUVA 6. Erilaisia kestomagneettitahtikoneen roottorirakenteita (Hietalahti 2012, 71)

Yleisin roottorirakenne on pintamagneettiroottori. Pinnalle asennettavien magneettien ansiosta roottorin halkaisija ja samalla myös hitausmomentti saadaan pieneksi. Upotettavia magneetteja käytettäessä roottori on suurempi, ja näin myös hitausmomentti kasvaa suuremmaksi. Pintamagneettiroottori on rakenteeltaan uppomagneetikoneen roottoria yksinkertaisempi. Uppomagneetikoneessa magneettien asentaminen roottorin sisään on työläämpää, mutta toisaalta rakenne on mekaanisesti vahvempi. Lisäksi magneetit ovat suojassa sähköisiä ja mekaanisia rasituksia sekä kemiallista kulumista vastaan. (Hietalahti 2011, 114)

2.4 Varavoimalaitteen varusteet

Turvallisen käytön vuoksi aggregaateissa tulee olla suojalaitteet, jotka takaavat henkilö- ja laiteturvallisuuden. Varavoimalaitteen generaattori ei saa aiheuttaa vauriota muille laitteille eikä itse varavoimakoneelle. Kuluttajan ohjeistamiseksi laitteissa tulee olla arvokilvet sekä laitteen asennusta, käyttöä ja huoltoa koskevat ohjeet. Arvokilvessä ilmoitetaan muun muassa nimellisjännite, mitoitus-teho, tehokerroin, nimellispyörimisnopeus, nimellistaajuus ja kotelointiluokka. Laitevalmistajan pitäisi myös ilmoittaa laitteen sähköiset suojausominaisuudet, kuten sen syöttämän oikosulkuvirran suuruus. Aggregaatit tai niiden syöttämät laitteistot pitää varustaa erotuslaitteilla, jotka estävät käytön aiheuttaman vaaran tai häiriön käyttäjälle, asennukselle tai jakeluverkolle. Erottamista koskevat vaatimukset on esitetty standardissa SFS 6000-5-53, jonka mukaisesti

erotus voidaan toteuttaa esimerkiksi käyttämällä kuormanerotimia tai -kytkimiä, pistokytkimiä tai sulakkeita. (ST 52.40)

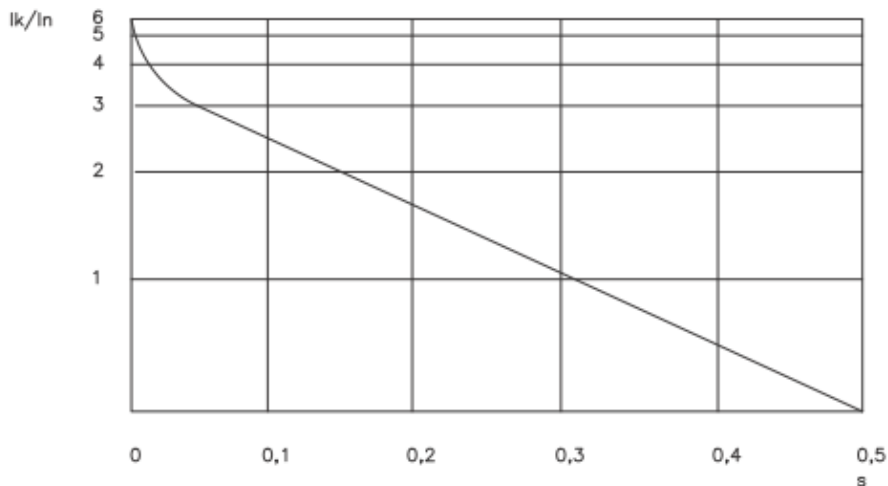
2.5 Varavoimageraattori oikosulkuilanteessa

Aggregaatin suojalaitteiden valinnan kannalta on erityisen tärkeää tuntea generaattorin toiminta oikosulun aikana. Jotkut aggregaatit voivat syöttää jatkuvaa oikosulkuvirtaa, mutta joillakin generaattoreilla jännite laskee voimakkaasti vikatilanteessa, jolloin suojalaitteet eivät välttämättä toimi oikealla tavalla. Hitsauksessa aggregaatin pitäisi myös pystyä tuottamaan vaadittu oikosulkuvirta. (STEK)

Asynkronisissa generaattoreissa ei ole välttämättä erillistä ylivirtasuojaa, jolloin suojaus perustuu generaattorin virransyöttöön; vikatilanteessa magnetointivirtaa pienentämällä generaattorin jännite putoaa lähes nolnaan. Synkroninen generaattori voi puolestaan mahdollisen lisämagnetointilaitteen ansiosta syöttää jatkuvaa oikosulkuvirtaa vikatilanteessa. (ST 52.40 2012)

2.5.1 Generaattori ei syötä jatkuvaa oikosulkuvirtaa

Generaattori, joka ei syötä vikatilanteessa jatkuvaa oikosulkuvirtaa, syöttää oikosulun alussa vain nopean virtatransientin. Tällaiseen tilanteeseen sopii suojaksi vakioaikaylivirtasuojaja, joka toimii oikosulkusuojana. Vikatilanteessa oikosulkuvirta laskee ilman magnetointivirran lisäystä nopeasti alle ylivirtasuojan havahtumisarvon, jolloin suojaus voidaan toteuttaa alijänniteportaan sisältävällä suojalaitteella. Se ylläpitää ylivirtahavah- tumaa asetellun ajan ja katkaisee syötön, jos jännite ei palaa sallitulle alueelle. Kuvassa 7 on esimerkki oikosulkuilanteen virtakäyrästä, kun generaattori ei syötä pysyvää oikosulkuvirtaa. (ST 52.40 2012)

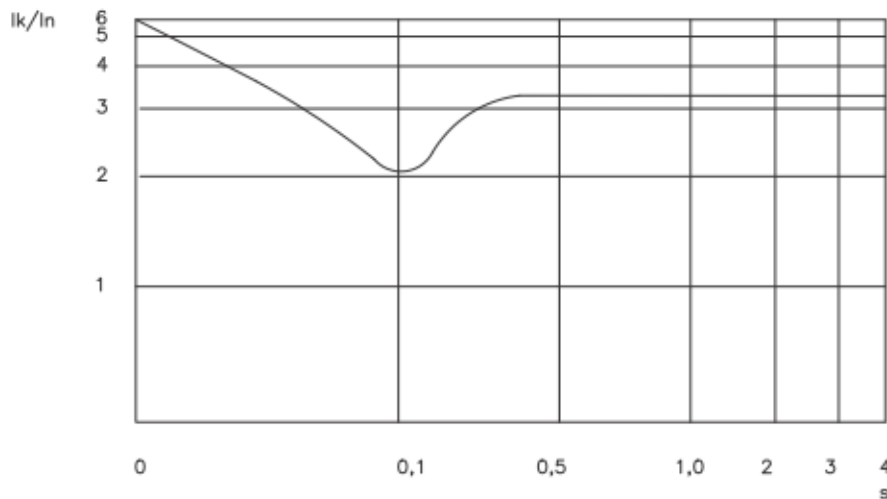


KUVA 7. Generaattorin virtakäyrä vikatilanteessa, kun generaattori ei syötä jatkuvaa oikosulkuvirtaa (ST 52.40 2012)

Virtakäyrästä huomataan, että oikosulussa generaattori syöttää suuren alkuoikosulkuvirran, joka vaimenee oikosulkutilanteen edetessä. Virran amplitudin suuruus riippuu hetkellisjännitteen suuruudesta. Generaattorin navoissa tapahtuva 3-vaiheinen oikosulku aiheuttaa jopa 6-kertaisen vikavirran, joka putoaa 2,5-kertaiseen arvoon jo tavallisesti 0,1 sekunnissa. Kuormitukseen perustuvat normaalit oikosulkusuojalaitteet eivät välttämättä ehdi reagoida tai kaukana generaattorista oleva vika ei riitä laukaisuun, jolloin vikavirta voi jäädä päälle aiheuttaen palovaaran. Oikosulkusuojauksen on siis perustuttava muihin suojausmenetelmiin; TN-S -järjestelmässä voidaan käyttää esimerkiksi vikavirtasuojakytkintä. (Hietalahti 2011, 102; ST 52.40 2012)

2.5.2 Generaattori syöttää jatkuvaa oikosulkuvirtaa

Oikosulkuvirran tulee olla jatkuva ja riittävän suuri suojausten toiminnan kannalta. Jatkuvan oikosulkuvirran syöttö vikatilanteessa voidaan varmistaa generaattorin lisämagnetointilaitteella. Tämä helpottaa oikosulkusuojien valintaa ja selektiivisyyden saavuttamista. Generaattorilta vaaditaan yleensä 2,2–2,9 -kertaista oikosulkuvirtaa. Vian alussa generaattorin navoissa esiintyvä oikosulkuvirta voi olla jopa 6-kertainen nimellisvirtaan verrattuna ennen putoamista vakioarvoonsa (kuva 8). (ST 52.40 2012)



KUVA 8. Generaattorin virtakäyrä vikatilanteessa, kun generaattori syöttää jatkuvaa oikosulkuvirtaa (ST 52.40 2012)

Kuvasta 8 nähdään, kuinka alkutilanteen jälkeinen magnetoinnin lisäys eli oikosulkumagnetointi nostaa jatkuvan oikosulkuvirran nimellisvirtaa suuremmaksi. Pidempikes-
toisella oikosulkuvirralla mahdollistetaan myös 5 sekunnissa toimivien suojalaitteiden
käyttö kiinteissä asennuksissa. Suojalaitteet voivat sijaita aggregaatissa tai syötettävässä
laitteistossa. Kiinteissä asennuksissa ryhmäjohtotason suojalaitteet sijaitsevat itse asen-
nuksessa, ja tällöin on varmistettava, että suojalaitteet toimivat riittävän nopeasti, vaikka
selektiivisyyttä ei saavutettaisikaan. (ST 52.40 2012)

2.6 Suojaus varavoimalaitteen syöttämässä sähkölaitteistossa

Siirrettävällä aggregaatilla syötettävä laitteisto tulee varustaa suojalaitteella, joka suorit-
taa vikatilanteessa automaattisesti nopean kuormituksen poiskytketymisen. Suojalait-
teet voivat sijaita joko itse aggregaatissa tai sen välittömässä läheisyydessä, ja ne mitoi-
tetaan siten, että ne suojaavat sähköiskuilta ja johtojen vahingolliselta lämpenemiseltä.
Suojaus voidaan toteuttaa yksinkertaisimmillaan syötettäessä aggregaatilla siirrettäviä
sähkölaitteita, esimerkiksi sähkötyökaluja, jolloin suojalaitteet ovat usein valmiina ag-
gregaatissa. Kiinteitä asennuksia syötettäessä suojausvaatimukset vaihtelevat jakelujär-
jestelmän mukaan. (STEK)

2.6.1 Suojaerotus varavoimalaitteen suojausmenetelmänä

Sähköinen erotus on yleisin pienen siirrettävän aggregaatin suojausmenetelmä. Sähköinen erotus toteutetaan siten, että sähkölaite erotetaan syöttävästä verkosta erotusmuuntajalla eikä toisiopiiriä maadoiteta. Aggregaatissa pistorasian suojakosketin on yhdistetty generaattorin runkoon ja muihin laitteen jännitteisiin osiin, ja käämitys on yhdistetty pistorasian äärijohtimiin. Kyseisen laitteen runkoa ei saa tarkoituksella kytkeä maapotentiaaliin, vaan varavoimalaitteessa on usein ulkoinen maadoituksen liitäntäpiste erillistä maadoituselektrodiä varten. Maadoitusta tulee käyttää syötettäessä aggregaatilla TN- ja IT-järjestelmiä. Myös yleisen jakeluverkon maadoituksesta erillään olevaan kiinteään sähkölaitteistoon tulee asentaa oma maadoituselektrodi. (ST 52.40 2012)

2.6.2 Varavoimakoneen vikasuojaus

Aggregaatilla syötettyjen kiinteiden asennusten vikasuojaus voidaan toteuttaa standardin SFS 6000 kohtien 413 ja 551.4 mukaisesti. Kiinteää asennusta syötettäessä pienen siirrettävän aggregaatin suojausmenetelmänä voidaan käyttää sähköistä erotusta. Suurempien varavoimakoneiden yhteydessä käytetään syötön automaattista poiskytkentää, mutta usein suojauksen tekee ongelmalliseksi aggregaatin tuottama liian pieni oikosulkuvirta tai oikosulkuvirran liian lyhyt kesto syötön nopeaan poiskytkentään. Johdonsuojakatkaisijoiden eri laukaisukäyrien vaikutus nopeaan laukaisuun tulee ottaa huomioon; esimerkiksi B-tyyppin johdonsuojakatkaisija toimii varmasti alle 0,1 sekunnissa vähintään 5-kertaisella oikosulkuvirralla nimellisvirtaan nähden, kun puolestaan C-tyyppin johdonsuojakatkaisija tarvitsee 10-kertaisen oikosulkuvirran toimiakseen. (ST 52.40 2012)

Syötön automaattista poiskytkentää ei siis voida aina toteuttaa tavallisilla ylivirtasuojilla aggregaatin syöttämässä laitteistossa. Tällöin suojaus voidaan toteuttaa käyttämällä erilaisia vikavirtasuojakytkimiä tai maasulku-, vakioaikaylivirta- tai alijännitesuojalaitteen ohjaamaa kompaktikatkaisijaa. Kiinteässä asennuksessa nopean laukaisun ehdot toteutuvat normaalisti TN-S -järjestelmässä vikavirtasuojakytkimen avulla. Jos suojalaite sijaitsee aggregaatin syöttämässä TN-S -järjestelmässä itse varavoimalaitteessa, vikavirtasuojakytkimen toiminta edellyttää maadoituselektrodin asentamista aggregaattiin. (ST 52.40 2012)

Vian aikana syntyvä mahdollinen kosketusjännite ei saa kasvaa liian suureksi. Suojalaitteen tulee kytkeä pois vaarallinen kosketusjännite, jos sen pidempiaikainen arvo ylittää 50 V vaihtojännitteellä. Generaattorikäytössä jatkuvaa oikosulkuvirtaa syöttämättömät laitteet eivät yleensä aiheuta kosketusjännitevaaraa jännitteen nopean pienenemisen takia, mutta jatkuvaa oikosulkuvirtaa syöttävät generaattorit sen sijaan voivat synnyttää vaarallisiakin kosketusjännitteitä. (ST 52.40 2012)

Suojausvaatimukset toteutuvat parhaiten aggregaatin syöttäessä TN-S -järjestelmää, jossa suojalaitteena käytetään vikavirtasuojaa. Vanhojen rakennusten sähköasennukset on toteutettu yleisesti TN-C-S -järjestelmänä, jolloin osassa asennusta on käytetty yhdistettyä nolla- ja suojamaadoitusjohdinta. Tällöin suojausta ei voida toteuttaa vikavirtasuojakytkimen avulla, vaan suojausvaatimukset täytyvät esimerkiksi käyttämällä alijännite- tai vakioaikaylivirtarelesuojausta. (ST 52.40 2012)

2.6.3 Ylivirtasuojaus varavoimakoneen syöttämässä sähkölaitteistossa

Aggregaatilla syötettyjen sähkölaitteistojen ylivirtasuojaus toteutetaan standardin SFS 6000-4-43 kohdan 433.1 ja standardin SFS 6000-5-55 kohdan 551.5 mukaisesti. Ylikuormitussuojaus pitää toteuttaa niin, että suojalaite toimii kaikissa generaattorin käyttötilanteissa. Suojaus voidaan toteuttaa käyttämällä esimerkiksi lämpörelettä, mutta on kuitenkin otettava huomioon, että sulake toimii johdon ylikuormitussuojana luotettavasti vasta vähintään 1,45-kertaisella ylivirralla johdon kuormitettavuuteen nähden. Oikosulun yhteydessä vikavirta voi pudota nopeasti niin pieneksi, ettei riittävän nopeaa oikosulkusuojasta voida toteuttaa ylivirtasuojalla. Tällöin lisäsuojana voidaan käyttää esimerkiksi alijännitesuojausta. (ST 52.40 2012)

2.7 Varavoimalaitteen valinta ja mitoitus

Aggregaatteja on monenlaisia ja ne ovat kooltaan useimmiten muutaman kVA:n ja muutaman kymmenen kVA:n väliltä. Yksivaiheisia aggregaatteja on saatavilla muutama kVA:han asti, mutta suuremmat laitteet ovat kolmivaiheisia. Jotkut kolmivaiheiset aggregaatit on tarkoitettu vain symmetriselle kuormitukselle, jolloin kuormituksen tulee olla jokaisessa vaiheessa yhtä suuri. (STEK)

Aggregaatin valinta perustuu syötettävän laitteiston ominaisuuksiin. Varavoimalaitteen koko on syytä miettiä tarkkaan laitetta hankkiessa ja varavoimalaitteen syöttämään verkkoon kannattaa liittää vain tärkeimmät sähkölaitteet, kuten valaistus ja lämmitysjärjestelmät, joihin laitteen mitoitus perustuu. Kokonaistehontarvetta laskettaessa resistiivisen kuorman lisäksi tulee huomioida myös reaktiivisen ja epälineaarisen kuormituksen osuus, jolloin mitoitus perustuu näennäistehoon. Oikosulkumoottoreiden ja elektronikkalaitteiden synnyttämät yliaallot ja loisteho aiheuttavat pienemmän tehokertoimen, joten pelkkään pätötehoon perustuva mitoitus voi johtaa liian pienen aggregaatin valintaan. Jos vikatilanteiden aikana on tarpeen käyttää tietokoneita, käyttöön on valittava aggregaatti, joka tuottaa pienisäröisen vaihejännitteen (ST 52.40 2012).

Aggregaatti tulee mitoittaa vähintään suurimman odotettavissa olevan kuormituksen mukaan, ja kokonaistehontarvetta arvioitaessa tulee huomioida myös kuormalaitteen käyttäytyminen; esimerkiksi moottorit vaativat suuren käynnistysvirran. Suorakäynnisteisen oikosulkumoottorin käynnistysvirta voi nousta jopa 6–7 -kertaiseksi nimellisvirtaan nähden. Samalla generaattorin jännitteen lasku voi aiheuttaa aggregaatissa mahdollisesti olevan alijännitelaukaisulaitteen laukeamisen. Varavoimakone tulisikin mitoittaa siten, että varavoimageneraattorilla syötettävän sähkömoottorin teho ei olisi yli 10 % varavoimageneraattorin nimellistehosta. (ST 52.40 2012; STEK)

Aggregaatin valinnassa on tärkeää huomioida suojalaitteiden toimivuus ja varavoimalaitteen toiminta oikosulkutilanteessa erityisesti syötettäessä kiinteää asennusta. Kiinteässä asennuksessa käytetty jakelujärjestelmä vaikuttaa olennaisesti käytettävään suojausmenetelmään. Aggregaatin tuottama oikosulkuteho on pienempi kuin kiinteän sähköverkon tuottama oikosulkuteho, jolloin normaalisti verkkokäytössä toimivat suojalaitteet eivät välttämättä toimi varavoimakonekäytössä. (STEK)

Aggregaatin valinnassa on kiinnitettävä huomiota myös laitteen käyttöympäristöön ja aggregaatin kotelointiluokkaan. IP-koodeissa käytetään täydentäviä kirjaimia. Aggregaattikäytössä on oleellista, onko vesisuojaus koestettu laitteen pyörievien osien liikkussa (täydentävä kirjain M) vai niiden ollessa paikoillaan (täydentävä kirjain S). Vain täydentävällä kirjaimella M varustettu aggregaatti täyttää kotelointiluokkansa vaatimukset pyöriessään. (ST 52.40 2012)

3 JAKELUJÄRJESTELMÄT JA SÄHKÖTURVALLISUUS

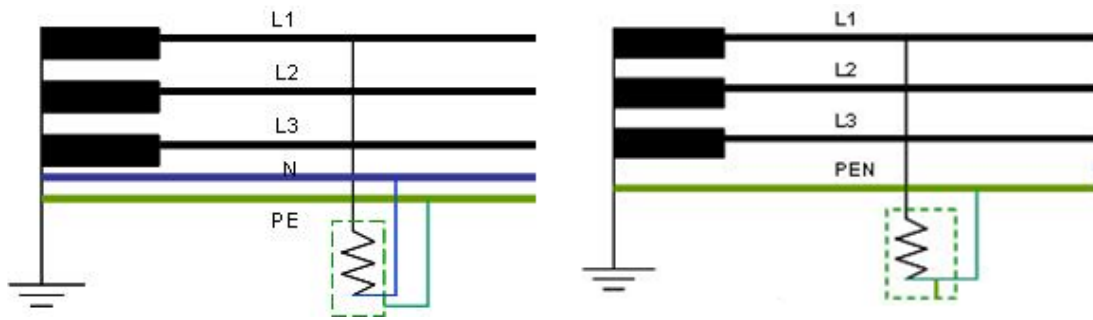
Pienkiinteistö liitetään sähköverkkoon kolmi- tai yksivaiheisesti, mutta lisääntyneen sähkön käytön vuoksi liittymät ovat nykyisin pääosin kolmivaiheisia. Useimmin käytetyt sähkölaitteet ovat yksivaiheisia, mutta esimerkiksi sähkökiuas ja sähköliesi vaativat kolmivaiheisen liittynnän. Seuraavissa kappaleissa käsitellään erilaisia jakelujärjestelmiä ja suojausmenetelmiä.

3.1 Jakelujärjestelmät

Sähkön jakelujärjestelmät voidaan jakaa TN-, TT- ja IT-järjestelmiin käytetyn maadoitustavan perusteella. Moottorigeneraattoreiden syöttämien sähköasennusten suojaus poikkeaa tavallisista suojaustavoista. Jakelujärjestelmä vaikuttaa oleellisesti aggregaatin syöttämän sähkölaitteiston suojauksen toteutukseen. Moottorigeneraattoreiden vikavirtasuojaus perustuu pääosin TN-S -järjestelmän maasulku- ja vikavirtaan, jolloin ongelmia syntyy syötettäessä TN-C- tai TN-C-S-laitteistoa, jossa ei ole erillistä PE-johdinta. Jos kiinteässä asennuksessa on käytössä nollauksia, PEN-johdin tai N- ja PE-piirien eriyttämiskappale, laitteiston normaali käyttö vaatii asennusmuutoksia. (ST 52.40 2012)

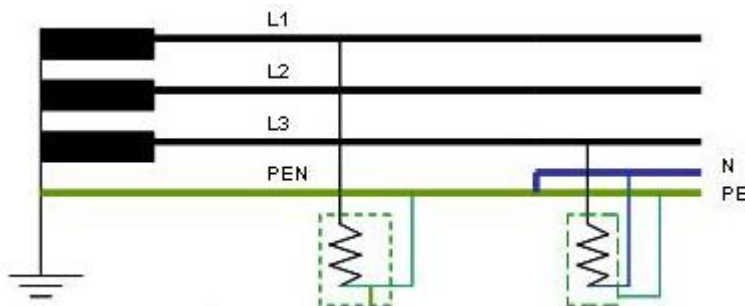
3.1.1 TN-järjestelmät

TN-järjestelmässä yksi piste on yhdistetty suoraan maahan ja laitteiden jännitteelle alttiit osat on yhdistetty tähän maadoituspisteeseen suojamaadoitus- tai PEN-johtimella. TN-järjestelmät jakautuvat TN-S- ja TN-C -järjestelmiin sekä näiden yhdistelmään TN-C-S -järjestelmään. TN-S -järjestelmässä on erillinen nolla- ja suojamaadoitusjohdin kun puolestaan TN-C -järjestelmässä nämä johtimet on yhdistetty yhdeksi PEN-johtimeksi (kuva 9).



KUVA 9. TN-S -järjestelmä (vasen kuva) ja TN-C -järjestelmä (oikea kuva) (Virtuaali AMK)

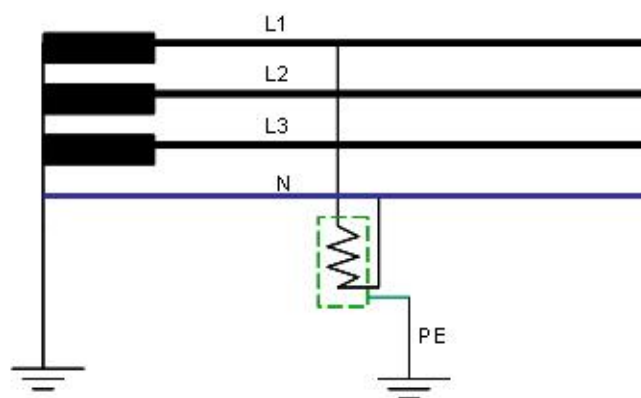
Kiinteistöjen sisäisessä verkossa on käytetty yleensä TN-C-S -järjestelmää, jossa osassa järjestelmää on yhdistetty nolla- ja suojamaadoitusjohdin (kuva 10). Uusissa asennuksissa TN-S -järjestelmää pitää käyttää pääkeskukselta eteenpäin, sillä TN-C -järjestelmässä PEN-johtimen katkeaminen voi aiheuttaa vaaratilanteen suojamaadoitettujen osien tullessa jännitteisiksi. Yksivaihejärjestelmässä on tavallisesti kolme johdinta (L, N ja PE), mutta esimerkiksi moottorikäytöissä sekä symmetrisissä ja yliaallottomissa kuormitustilanteissa nollajohdin on usein tarpeeton. (D1-2012, 62–64; Virtuaali AMK)



KUVA 10. TN-C-S -järjestelmä (Virtuaali AMK)

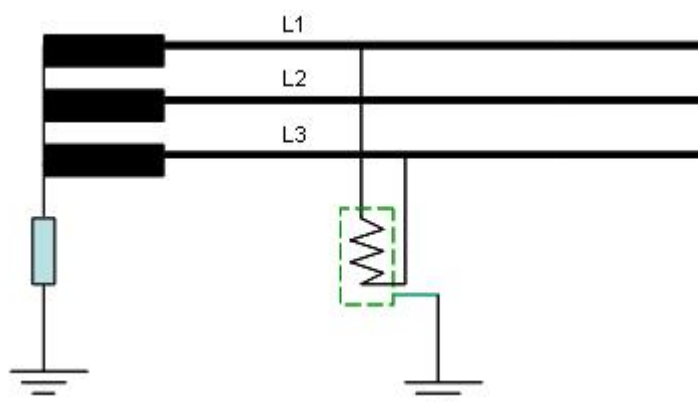
3.1.2 TT-järjestelmä ja IT-järjestelmä

TT-järjestelmässä virtapiirin yksi piste on maadoitettu ja jännitteelle alttiit osat on yhdistetty erillisen maadoituselektrodin avulla maahan (kuva 11). Kyseisen järjestelmän käyttö on hyvin harvinaista Suomessa. TT-järjestelmän ongelmallisuus liittyy vikasuojaukseen; vikasuojausta ei voida toteuttaa ylivirtasuojilla, sillä vikatilanteessa virta kulkee maan kautta ja piirin impedanssi on yleensä suuri. Nopean poiskytkennän varmistaminen edellyttääkin aina vikavirtasuojan käyttöä. (D1-2012, 66)



KUVA 11. TT-järjestelmä (Virtuaali AMK)

IT-järjestelmä on maasta erotettu järjestelmä, jossa mitään virtapiirin osaa ei ole yhdistetty suoraan maahan (kuva 12). Sähkölaitteiden jännitteelle alttiit osat on yhdistetty erillisiin maadoituselektrodeihin tai suojajohtimella yhteiseen elektrodiin. IT-järjestelmässä nollajohtimen käyttö on mahdollista, mutta sen käyttöä ei suositella. IT-järjestelmää käytetään varsinkin silloin, kun maasulun aiheuttama käyttökeskeytys halutaan estää tai siirtää. Käyttökohteita ovat muun muassa leikkaussalit ja ohjauspiirit. (D1-2012, 66, 69)



KUVA 12. IT-järjestelmä (Virtuaali AMK)

3.2 Suojausmenetelmät

Ihmiset ja eläimet tulee suojata vaaroilta, joita voi syntyä koskettaessa jännitteelle alttiita osia sekä normaalissa tilassa että vian aikana. Lisäksi ihmiset ja omaisuus tulee suojata jännitteisissä johtimissa kulkevan ylivirran aiheuttamilta vahingoilta. Suojaaminen sähköiskulta sisältää sekä perussuojauksen että vikasuojauksen. Perussuojauksen avulla estetään ihmisiä koskettamasta jännitteisiä osia sähkölaitteiden ollessa normaalitilassa.

Vikasuojaus puolestaan tarkoittaa suojausta, jolla estetään ihmisiä koskettamasta vian takia jännitteiseksi tulleita osia niin, että se aiheuttaisi vaaraa. Kosketusjännite tarkoittaa ihmiskehon kosketuskohdan ja maan potentiaalın välistä jännitettä, joka vaikuttaa ihmiseen hänen koskettaessa vikatilanteen aikana suojamaadoitettuja osia. Kosketusjännite on vaarallinen sen aiheuttaessa elimistön läpi kulkevan hengenvaarallisen vikavirran. (D1-2012, 78; SFS 6000-1-131; Hietalahti 2013, 30)

Maadoittamisella on tärkeä merkitys sähköturvallisuuden takaamisessa. Maadoitus tarkoittaa virtapiirin osan tai sähkölaitteen johtavan osan yhdistämistä maadoituselektrodilla maahan. Suojamaadoittaminen tarkoittaa virtapiiriin kuulumattoman johtavan osan, kuten laitteen kuoren, yhdistämistä suojajohtimella maadoitusjärjestelmään. Sähkölaitteen vikaantuessa suojamaadoituksen tarkoituksena on muodostaa suljettu virtapiiri, jossa vikavirta kulkee vikakohdasta suojajohtimen välityksellä verkon nolajohtimeen. (Hietalahti 2013, 30)

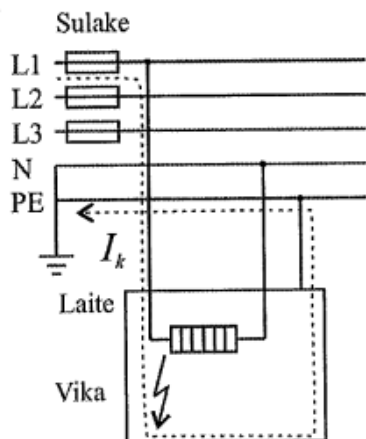
3.2.1 Perussuojaus

Perussuojausmenetelmät voidaan jakaa seuraavasti: suojaukseen kaikelta koskettamiselta ja suojaukseen tahattomalta koskettamiselta. Täydellisin suoja saavutetaan eristämällä jännitteiset osat ja käyttämällä kotelointia tai suojuksia. Asettamalla jännitteiset osat kosketusetäisyyden ulkopuolelle ja käyttämällä esteitä saavutetaan vain osittainen suojaus koskettamiselta. Tavanomaiset perussuojausmenetelmät voivat joskus kuitenkin pettää esimerkiksi eristeiden heikentymisen tai sähkölaitteen käyttäjien huolimattomuuden takia. Sähköiskun vaaraa voidaan tällöin pienentää käyttämällä nimellisvirraltaan korkeintaan 30 mA:n vikavirtasuojakytkintä. (D1-2012, 79 & 113)

3.2.2 Vikasuojaus

Sähkölaitteen käytöstä ei saa aiheutua hengenvaaraa vikatilanteessakaan esimerkiksi peruseristyksen vioittuessa. Vikasuojaus voidaan toteuttaa estämällä virran kulku ihmisen kautta, rajoittamalla vikavirta vaarattomaan arvoon tai rajoittamalla virran kesto aika vaarattoman lyhyeksi. Yleisin asennusten vikasuojausmenetelmä on suojaus syötön automaattisen poiskytkennän avulla. Sen tehtävänä on poistaa eristysvian aiheuttama vi-

kavirta ja syntyvä kosketusjännite niin nopeasti, ettei niistä aiheudu vaaraa ihmiselle. Suojaus vaatii toimiakseen suunnitellun vikavirtapiirin ja sopivan suojalaitteen. Vikavirtapiirissä tulee olla johtava yhteys, joka mahdollistaa vikavirran kulkemisen. Tämä edellyttää, että asennuksessa sähkölaitteiden jännitteelle alttiit osat yhdistetään suojajohdimmella maadoitusjärjestelmään. Käytetty maadoitusjärjestelmä vaikuttaa vikavirtapiirin rakenteeseen. Kuvassa 13 on esitetty katkoviivalla virtapiiri, joka muodostuu sähkölaitteen eristysviassa jännitteisen osan ja ulkokuoren välillä.



KUVA 13. Sähkölaitteen eristysvika ja syntyvä vikavirtapiiri (Hietalahti 2013, 36)

Kuvasta nähdään, että suojajohdin muuttaa eristysvian yksivaiheiseksi oikosuluksi, jolloin virta kasvaa suureksi ja sulake palaa nopeasti. Nopea suojaus edellyttää, että vikavirtapiirin impedanssi on tarpeeksi pieni. Vikavirta pitää kytkeä pois sopivalla suojalaitteella. Syötön automaattinen poiskytkentä voidaan toteuttaa sulakkeiden tai johdonsuojakatkaisijoiden avulla. Sallittu poiskytkentäaika riippuu muun muassa esiintyvän kosketusjännitteen suuruudesta. Kosketusjännitettä tulee myös rajoittaa esimerkiksi potentiaalintasauksella eli yhdistämällä jännitteelle alttiit ja muut johtavat osat samaan potentiaaliin. (D1-2012, 85)

Vikasuojaus voidaan toteuttaa myös käyttämällä suojaeristystä, sähköistä erotusta tai pienoisjännitettä. Suojaeristetyssä sähkölaitteessa käytetään kaksoiseristystä tai vahvistettua eristystä. Sähköinen erotus toteutetaan erottamalla sähkölaitetta syöttävä maadoittamaton piiri erotusmuuntajalla syöttävästä verkosta. Tällä estetään vian aikainen kosketusjännite toisiopiirissä, kunhan ensiöpiirin jännite ei pääse siirtymään galvaanisesti toisioon. Käytettäessä suojaerotusmuuntajaa puhutaan suojaerotuksesta, joka antaa hyvän suojaustason, ja jota käytetään vaikeissa olosuhteissa, kuten varavoimajärjestelmissä. Pienoisjännitettä käyttämällä taataan, että kosketusjännite ja virta ovat riittävän pie-

niä aiheuttaakseen hengenvaaraa. SELV- ja PELV-pienoisjännitejärjestelmissä nimellisjännite saa vaihtojännitteellä olla enintään 50 V ja sykkeettömällä tasajännitteellä 120 V. (D1-2012, 11, 112, 116)

3.2.3 Lisäsuojaus

Vikavirtasuojia voidaan käyttää lisäsuojana perussuojauksessa ja syötön nopeassa poiskytkennässä TN-, TT- ja IT-järjestelmissä silloin, kun oikosulkuvirta ei ole riittävän suuri ylivirtasuojan nopeaan toimintaan. Vikavirtasuoja suojaa käyttäjää vaaralliselta sähköiskulta esimerkiksi tilanteessa, jossa ihminen on suorassa kosketuksessa jännitteeseen osaan ja maahan, tai jos suojajohdin on poikki ja sähkölaitteeseen tulee eristysvika. Vikavirtasuojakytkin on laite, jossa summavirtamuuntaja mittaa vaihe- ja nollajohtimen virran summaa. Jos sähkölaitteesta tai johdosta vuotaa virtaa esimerkiksi ihmisen kautta maahan, mitatun virran summa eroaa nollostaa, ja summavirran ylittäessä suojan toiminta-arvon kytkin avaa virtapiirin. Vikavirtasuojan toiminta edellyttää, että virtapiirin nolla- ja suojajohdinpiirit ovat erillään, kuten esimerkiksi TN-S -järjestelmässä. (D1-2012, 244)

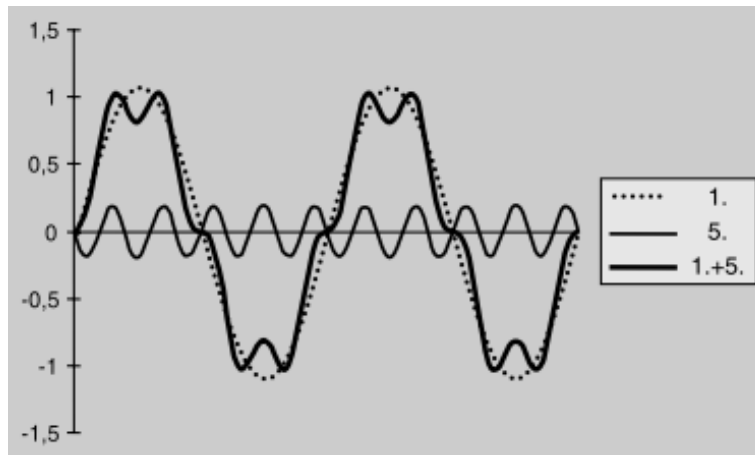
Vikavirtasuojia vaaditaan käytettäväksi lisäsuojana tietyissä asennuksen osissa. Tavanomaiset mitoitusvirraltaan enintään 20 A:n maallikoiden käyttämät pistorasiat tulee suojata enintään 30 mA:n vikavirtasuojilla. Vaatimus koskee muun muassa asuntoja sekä liike- ja toimistorakennuksia. Lisäsuojaus voidaan kuitenkin jättää pois pistorasioista, jotka syöttävät määrättyjä laitteita, ja joiden syötön katkeaminen aiheuttaisi ongelmia, kuten jääkaapin pistorasia. Ulkotiloissa enintään 30 mA:n vikavirtasuojaa käytetään suojaamaan enintään 32 A:n pistorasioita ja siirrettäviä laitteita. (D1-2012, 247)

4 SÄHKÖN LAATU

Sähkön hyvä laatu on turvallisen ja luotettavan sähkönjakelun ehto. Sähkön laatu on tärkeä tekijä erityisesti teollisuusprosessien kannalta, sillä tuotannon keskeytykset tulevat kalliiksi. Myös virheetöntä sähköä vaativien herkkien laitteiden määrä kotitalouksissa on lisääntynyt. Jännitetason vaihtelut ja jännite- tai virtapiikit aiheuttavat ongelmia, sillä sähkölaitteiden suorituskyky on riippuvainen jakelujännitteestä. Sähkön laadun ongelmat voivat näkyä kuluttajilla myös kohonneina loistehomaksuina, laitevaurioina ja toimintahäiriöinä. (ABB 2000, 113)

4.1 Yliaallot

Sähkölaitteet suunnitellaan toimimaan sinimuotoisella jännitteellä, jolloin ne tarvitsevat lähes virheettömän jännitteen toimiakseen tarkoitetulla tavalla. Eräs sähkön laatua huonontava tekijä on yliaallot, joiden osuus on kasvanut merkittävästi. Virran tai jännitteen suhteen epälineaariset komponentit synnyttävät sähkönjakeluverkkoon yliaaltoja, jotka lisäävät verkon jännitesäröä. Tällöin jännitteen tai virran käyrämuoto eroaa sinimuotoisesta signaalista, ja se sisältää eritaajuisia komponentteja eli perustaajuuden kerrannaisia (kuva 14). Yliaallot voidaan jakaa parillisiin ja parittomiin sekä harmonisiin ja epäharmonisiin yliaaltoihin. Harmoninen yliaaltojännite tarkoittaa sinimuotoista jännitettä, jonka taajuus on jännitteen perusaallon taajuus kokonaisluvulla kerrottuna, kun puolestaan epäharmoninen yliaaltojännite ei ole perustaajuuden monikerta. Harmoniset yliaallot syntyvät pääasiassa epälineaarisissa kuormissa. Epäharmonisten yliaaltojännitteiden osuus on lisääntynyt taajuusmuuttajien käytön lisääntymisen vuoksi. Verkon kannalta haitallisimmat ja yleisimmät yliaallot ovat kolmas (150 Hz), viides (250 Hz) ja seitsemäs (350 Hz) yliaalto. Yleisesti kolmivaiheiset kuormat aiheuttavat parittomia kuten viidettä ja seitsemättä yliaaltoa. Yksivaiheiset kuormat tuottavat näiden lisäksi kolmatta yliaaltoa ja sen kerrannaisia. (ABB 1999; ABB 2000, 116, 283)



KUVA 14. Kokonaisvirta perustaajuisen ja 5. yliaaltovirran summana (ABB 2001)

Epälineaaristen laitteiden määrä on lisääntynyt, jolloin myös verkon yliaaltojen määrä on kasvanut huonontaen sähkön laatua. Epälineaarisia kuormalaitteita ovat esimerkiksi loistelamput, purkauslamput, tietokoneet, tasasuuntaajat ja muut elektroniikkalaitteet. Kolmatta yliaaltoa aiheuttavia laitteita ovat erityisesti tietokoneet. Niiden käyttämä tasavirta muodostetaan tasasuuntauksella hakkuriteholähteellä, jolloin tietokonekuorman ottama virta poikkeaa sinimuotoisesta. (ABB 1999; Yliaalto-opus)

Yliaaltovirtoihin liittyy monenlaisia ongelmia. Ne aiheuttavat toimintahäiriöitä elektronisissa laitteissa ja synnyttävät ylimääräisiä häviöitä kaapeleissa, muuntajissa ja moottoreissa. Tämän vuoksi yliaaltolähteiden kanssa samassa sähkönsyötössä olevat laitteet voivat ylikuumentaa aiheuttaen tulipalovaaran. Yliaallot aiheuttavat myös automaatiolaitteiden ja suojarleiden virhetoimintoja sekä mittalaitteiden virhenäyttämiä. (STUL ry 2006, 30)

Yliaallot voivat levitä sähköverkossa aiheuttaen ongelmia myös muille verkon laitteille. Varavoimakoneella syötettäessä tämä voi olla haitallista, sillä generaattori tuottaa itsekin yliaaltoja ja synnyttää melko heikon verkon, jolloin yliaaltovirrat voivat aiheuttaa häiriötä muissa syötetyissä laitteissa. Invertteriagregaatit puolestaan tuottavat tasalaa- tuista ja pienisäröistä jännitettä, joten ne sopivat myös herkkien laitteiden sähkön syöt- töön. (STEK; Yliaalto-opus)

Kolmivaiheisessa verkossa symmetrisellä kuormituksella nollajohtimessa ei kulje vir- taa. Kuormituksen synnyttämät kolmannet yliaallot kuitenkin summautuvat samanvai- heisina nollajohtimeen, jolloin nollajohtimessa kulkeva virta saattaa olla vaihevirtoja suurempi. Tämä voi johtaa nollajohtimen ylikuormittumiseen ja tulipalovaaraan asen-

nuksissa, joissa nollajohdin on mitoitettu puoleen vaihejohtimen poikkipinnasta. (ABB 1999)

4.2 Loisteho

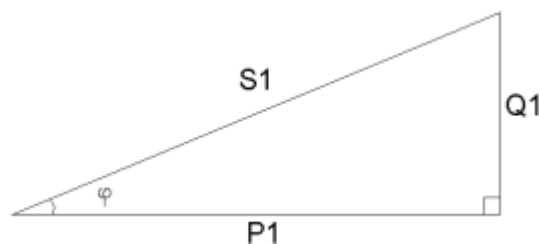
Kotitalouksissa monet laitteet kuluttavat pätötehon lisäksi loistehoa, jota ne tarvitsevat muuttuvien magneettikenttien ylläpitämiseen. Toisin kuin pätöteho, loisteho ei ole työtä tekevää tehoa. Loistehossa jännitteen ja virran välillä esiintyy vaihe-ero, jonka synnyttävät reaktiiviset komponentit eli induktiiviset ja kapasitiiviset kuormat. Induktiivinen kuorma aiheuttaa induktiivista loistehoa ja kapasitiivinen kuorma kapasitiivista loistehoa. Toisaalta taas induktiivinen kuorma kuluttaa loistehoa ja kapasitiivinen puolestaan tuottaa sitä. Kapasitiivinen kuorma aiheuttaa vaihtojännitteeseen vaihesiirron, jolloin virta on 90° jännitettä edellä. Induktiivisessa kuormassa puolestaan virta jää 90° jännitteestä jälkeen. (ST 52.15 2004; Aura & Tonteri 2005, 182)

Tavallisimpia loistehoa tarvitsevia laitteita ovat sähkömoottorit, loistelamput ja purkauslamput, joiden tehokertoimet ovat tyypillisesti taulukon 2 mukaisia. Laitteiden tarvitsema loisteho voidaan tuottaa sähköverkossa generaattorilla tai laitteiston läheisyydessä kompensointilaitteistolla. (ST 52.15 2004)

TAULUKKO 2. Eri kuormituslaitteiden tehokertoimia (ST 52.15 2004, muokattu)

Kuorma	tehokerroin $\cos \varphi$
moottori	0,7 - 0,85
tyristorikäytöt	0,4 - 0,75
loistepurkausvalaisimet	0,5 - 0,9

Loisteho Q ja pätöteho P muodostavat näennäistehon S kuvan 15 perustaaajuinen tehokolmion mukaisesti.



KUVA 15. Perustaaajuinen tehokolmio (ST 52.15 2004)

Termi $\cos\varphi$ tarkoittaa perusaaltoisen pätötehon tehokerrointa, joka lasketaan perustaa-juisen pätötehon ja perustaaajuinen näennäistehon suhteena seuraavasti

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{S_1} = DPF \quad (2)$$

, jossa

$\cos\varphi$ on perusaallon tehokerroin,

P_1 on perustaaajuinen pätöteho [kW],

S_1 on perustaaajuinen näennäisteho [kVA],

DPF on tehokerroin (Displacement Power Factor).

Tehokerroin PF huomioi verkon yliaallot ja tarkoittaa sähköisen pätötehon ja näennäis-
tehon välistä suhdetta. Näennäistehoon S on otettu huomioon säröteho D , joka sisältää
yliaaltotehoa sekä eritaajuisten virtojen ja jännitteiden tuloja (ST 52.15 2004).

PF voidaan laskea seuraavasti

$$PF = \frac{P}{S}, \text{ missä } S = \sqrt{P^2 + Q_1^2 + D^2} \quad (3)$$

, jossa

P on kokonaispätöteho [kW], $P = \sum P_n$,

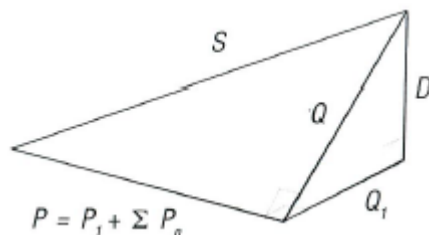
S on kokonaisnäennäisteho [kVA],

Q_1 on perustaaajuinen loisteho [kVAr],

D säröteho,

PF on tehokerroin (Power Factor).

Kuvassa 16 on havainnollistettu eri tehotyyppien summautumista myös säröteho D
huomioituna.



KUVA 16. Särötehon summautuminen (STUL ry 2006, 17)

4.3 Sähkön laatuvaatimukset

Standardissa SFS-EN 50160 Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet määritellään jännitteen ominaisuudet verkon käyttäjän liittymiskohdassa normaaleissa käyttöolosuhteissa. Standardi määrittelee rajat, joiden sisällä kuluttaja voi olettaa liittymiskohdan jännitteen ominaisuuksien pysyvän. Erillisverkoille kuten saareke- ja varavoimakäytölle on esitetty omat raja-arvot. Standardia ei sovelleta tilapäisissä sähkön syöttöjärjestelmissä, kun järjestelyn taustalla on esimerkiksi vikatilanne tai verkon huoltotyö eikä tapauksissa, joissa verkonkäyttäjän asennukset tai laitteet eivät täytä voimassa olevia standardeja tai teknisiä vaatimuksia. Myös poikkeuksellisissa tapauksissa, kuten erikoisissa sääolosuhteissa ja ulkopuolisten aiheuttamissa häiriöissä, kyseistä standardia ei voida soveltaa. (SFS-EN 50160)

Standardi määrittelee ja esittää vaatimuksia muun muassa seuraaville jakelujännitteen ominaisuuksille:

- taajuus
- jännitteen suuruus
- jännitteen aaltomuoto
- jännitteen symmetria.

4.3.1 Verkkotaajuus

Sähköverkon nimellistaajuuden tulee olla 50 Hz. Standardin mukaan normaaleissa käyttöolosuhteissa perustaajuuden keskiarvo tulee olla 10 sekunnin aikaväliltä mitattuna $50 \text{ Hz} \pm 1 \%$ (eli 49,5 Hz–50,5 Hz) 99,5 % vuodesta ja $50 \text{ Hz} + 4 \%$ / $- 6 \%$ (eli 47 Hz–52 Hz) 100 % vuodesta. Erillisverkoissa, kuten saareke- ja varavoimakäytöissä, taajuuden tulee olla $50 \text{ Hz} \pm 2 \%$ (eli 49 Hz–51 Hz) 95 % viikosta ja $50 \text{ Hz} \pm 15 \%$ (eli 42,5 Hz–57,5 Hz) 100 % ajasta. (SFS-EN 50160)

4.3.2 Jakelujännitteen suuruus ja jännitetason vaihtelut

Pienjänniteverkossa standardin mukainen nimellijännite U_n on vaiheen ja nollan välillä 230 V. Normaaleissa käyttöolosuhteissa jännitetason vaihtelut eivät saisi ylittää $\pm 10 \%$

nimellisjännitteestä. Jokaisen viikon mittausjakson aikana 95 % jakelujännitteen tehollisarvojen 10 minuutin jaksojen keskiarvoista tulee pysyä välillä $U_n \pm 10 \%$ ja kaikkien jakelujännitteen tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvojen tulee olla välillä $U_n + 10 \%$ / - 15 %. Syrjäseuduilla ja erillisverkoissa puolestaan jännitevaihtelut eivät saisi ylittää arvoja + 10 % / - 15 % nimellisjännitteestä. (SFS-EN 50160)

4.3.3 Jännitteen muutokset ja välkynnän häiritsevyysindeksi

Nopeat jakelujännitteen muutokset johtuvat pääasiassa kuluttajan verkossa tapahtuvista kuormitusmuutoksista, kytkennöistä tai vioista. Nopea jännitemuutos tarkoittaa jännitteen tehollisarvon nopeaa yksittäistä muutosta kahden tason välillä. Pienjänniteverkossa normaaleissa käyttöolosuhteissa nopea jännitemuutos ei yleensä ylitä arvoa 5 % nimellisjännitteestä, mutta joissakin olosuhteissa lyhytaikainen jännitteenmuutos voi olla jopa 10 % useamman kerran päivässä. Jännitemuutos luokitellaan jännitekuopaksi tai ylijännitteeksi kun muutos ylittää tietyn havahtumiskynnyksen. (SFS-EN 50160; Oulun Seudun Sähkö)

Standardissa SFS-EN 50160 jännitekuopalla tarkoitetaan tilannetta, jossa jakelujännitteen tehollisarvo alenee tilapäisesti 1–90 %:iin nimellisjännitteestä ja palautuu lyhyen ajan kuluttua. Ylijännitteen havahtumisjännite puolestaan on 110 % nimellisjännitteestä. Jännitekuopan aiheuttaa yleensä jakeluverkon vikatilanne kuten oikosulku, tai suuri virran kasvu kuten sähkökoneen käynnistys. Ylijännitteiden taustalla ovat tavallisesti kytkentätoimenpiteet ja kuormien erottaminen. (Elovaara & Haarla 2011, 440; SFS-EN 50160)

Nopeat jännitemuutokset aiheuttavat valojen välkyntää ja ongelmia herkille laitteille, kuten tietokoneille. Välkyntä tarkoittaa valonlähteen luminanssimuutosten aiheuttamaa näköaistimuksen vaihtelua. Tietyn tason ylittäessään välkyntä muuttuu ärsyttäväksi. Häiritsevyyteen vaikuttavat olennaisesti välkynnän amplitudi ja taajuus. Välkynnän häiritsevyyttä mitataan lyhytaikaisella häiritsevyysindeksillä P_{st} ja pitkäaikaisella häiritsevyysindeksillä P_{lt} . Normaaleissa käyttöolosuhteissa viikon pituisen jakson aikana välkynnän pitkäaikaisen häiritsevyysindeksin P_{lt} tulisi olla ≤ 1 95 % ajasta. (SFS-EN 50160)

4.3.4 Jakelujännitteen epäsymmetria

Monivaiheisissa järjestelmissä yksi- ja kaksivaiheisten kuormien jakaminen epätasaisesti eri vaiheille aiheuttaa jännite-epäsymmetriaa, joka tarkoittaa vaihejännitteiden tehollisarvojen tai niiden välisten kulmien eroavaisuutta. Vinokuormitus aiheuttaa yksittäisiin vaiheisiin huonon jännitteen laadun. Normaaleissa käyttöolosuhteissa jokaisen viikon mittausjakson aikana jakelujännitteen vastakomponentin 10 minuutin tehollisarvon keskiarvoista 95 % tulee olla välillä 0–2 % myötäkomponentin arvosta. (Elovaara & Haarla 2011, 442; SFS-EN 50160)

4.3.5 Harmoninen ja epäharmoninen yliaaltojännite

Harmonisia yliaaltojännitteitä voidaan arvioida joko yksittäin vertaamalla yliaallon suhteellista amplitudia perustaajuisen jännitteen amplitudiin tai yhdessä harmonisen kokonaissärökertoimen THD (total harmonic distortion) avulla. THD kuvaa harmonisten yliaaltojen määrää suhteessa joko jännitteen perustaajuisen komponentin tehollisarvoon (THD-F) tai signaalin tehollisarvoon (THD-R) kaavojen 4 ja 5 mukaisesti. Laskennassa otetaan huomioon yliaallot järjestyslukuun 40 asti, mikä on vakiintunut käytäntö. (STUL ry 2006, 29; SFS-EN 50160)

$$THD - F = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{40} U_n^2}{U_1}} \quad (4)$$

$$THD - R = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{40} U_n^2}{U}} \quad (5)$$

, joissa

U_1 on perustaajuisen jännitteen tehollisarvo,

U on jännitteen tehollisarvo,

U_n on n:nneen yliaaltojännitteen tehollisarvo.

Standardin SFS-EN 50160 mukaan normaaleissa käyttöolosuhteissa jokaisen viikon mittausjakson aikana 95 % jakelujännitteen kunkin harmonisen yliaaltojännitteen 10

minuutin tehollisarvojen keskiarvoista tulee olla pienempiä tai yhtä suuria kuin taulukossa Z olevat arvot (taulukko 3). Jakelujännitteen kokonaissärökertoimen THD tulee olla $\leq 8\%$ otettaessa huomioon harmoniset yliaallot järjestyslukuun 40 saakka. (SFS-EN 50160)

TAULUKKO 3. Harmonisten yliaaltojännitteiden sallitut arvot liittymiskohdassa järjestyslukuun 25 asti prosentteina perustaajuisesta jännitteestä U_n (ABB 2000, 121)

Parittomat yliaallot				Parilliset yliaallot	
kolmella jaottomat		kolmella jaolliset		järjestysluku h	suhteellinen jännite
järjestysluku h	suhteellinen jännite	järjestysluku h	suhteellinen jännite		
5	6 %	3	5 %	2	2 %
7	5 %	9	1,5 %	4	1 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6...24	0,5 %
13	3 %	21	0,5 %		
17	2 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

4.3.6 Transienttiylijännitteet

Transienttiylijännite tarkoittaa lyhytaikaista värähtelevää tai ei värähtelevää ylijännitettä, joka tavallisesti vaimenee voimakkaasti ja kestää enintään muutamia millisekunteja. Ilmiön taustalla ovat usein ukkonen, kytkennät ja sulakkeiden toimimiset. Transienttiylijännitteet jaotellaan ilmiön keston perusteella pitkiin, keskipitkiin ja lyhyisiin transientteihin. Pitkät transientit syntyvät esimerkiksi sulakkeen palamisesta ja lyhyet transientit kuormien kytkeytymisestä. Transientit aiheuttavat ongelmia erityisesti jänniteherkille laitteille. (SFS-EN 50160; ABB 2000, 115)

5 MITTAUKSET

Tutkittavalle aggregaatille suoritettiin erilaisia mittauksia laitteen käyttöturvallisuuden tutkimiseksi. Mittauksissa pyrittiin mallintamaan tilanteita, joissa kuluttaja voisi mahdollisimmin aggregaattia käyttää. ST-kortin 52.40 (2012) mukaan aggregaatti tulee maadoittaa maadoituselektrodin avulla laitteessa olevasta ulkoisesta maadoituksen liitäntäpisteestä ympäristöissä, joissa käytetään TN- tai IT-jakelujärjestelmää. Tämän vuoksi mittauksia suoritettiin sekä aggregaatti maadoitettuna että maadoittamattomana.

Standardissa SFS-EN 50160 esitetyt sähkön laadun vaatimukset perustuvat pääasiassa testimenetelmän mittausjakson 10 minuutin pituisten jaksojen keskiarvoihin; esimerkiksi jännitteen vaihtelu ja harmoniset yliaaltojännitteet mitataan 10 minuutin keskiarvoina ja taajuus 10 sekunnin keskiarvoina, joten aggregaatin syöttämän sähkön laadun tutkimiseksi mittausajaksi valittiin 10 minuuttia. Mittaukset toistettiin kolme kertaa luotettavien tulosten saamiseksi.

Mittalaitteina käytettiin Agilent Technologies DSO1012A oskilloskooppia ja Fluke 435 Power Quality Analyzer -mittalaitetta (kuva 17), jonka Logger -tiedonkeruutoiminnolla suoritettiin pitkät mittausjaksot. Saadut mittaustulokset analysointiin Power Log 3.4 -ohjelman avulla ja Fluke View -ohjelmaa käytettiin jännitteen ja virran kuvaajien tulostamiseen.



KUVA 17. Fluke 435 Power Quality Analyzer -mittalaite (Fluke 2014)

Mittaukset suoritettiin Tampereen ammattikorkeakoulun sähkötekniikan laboratoriossa tutkittavan aggregaatin ollessa käyttöohjeiden mukaisesti ulkotiloissa. Kuvassa 18 on

esitetty työssä käytetty mittauskytkentä ja mittalaitteet sekä Armekan 230V:n kuormituslaitteisto. Periaatteelliset mittauskytkennät on esitetty liitteissä 1 ja 2.



KUVA 18. Työssä käytetty mittauskytkentä

5.1 Generaattorilaitteiston käyttöönottotarkastus

Tutkimuksen alussa suoritettiin käyttöönottotarkastusmittauksia aggregaatin tutkimiseksi. Yleisesti sähkölaitteiston turvallisuus varmistetaan ennen laitteiston käyttöönottoa aistinvaraisen tarkastuksen ja mittausten avulla. Mittaukset täydentävät silmämääräisiä tarkastuksia, ja niillä varmistetaan muun muassa suojausjärjestelmien toimivuus. (D1-2012, 330, 337)

Standardissa SFS-EN 60204-1 Koneturvallisuus, Koneiden sähkölaitteisto määrittellään koneen sähkölaitteiston rakenteen turvallisuusvaatimukset sekä käyttöönottovaiheeseen liittyvät koestukset ja todentamiset. Käyttöönoton yhteydessä koneen sähkölaitteistolle tulee tehdä koneen tuotestandardin määrittämät testit. Jos koneelle ei ole sille tarkoit-

tua tuotestandardia, sille tehdään standardin SFS-EN 60204-1 mukaiset testit, joita ovat muun muassa jännitekoe, eristysresistanssimittaus ja suojajohdinpiirin jatkuvuuden todentaminen. Tutkittavalle aggregaatille suoritettiin suojajohtimen jatkuvuusmittaus ja eristysresistanssimittaus sekä tyhjäkäyntikoe. (SFS-EN 60204-1)

5.1.1 Suojajohdinpiirin jatkuvuusmittaus

Suojajohtimen jatkuvuusmittauksella varmistetaan kosketusjännitesuojauksen toimivuus, sillä suojajohdinpiirin tulee olla koko matkaltaan jatkuva vikatilanteiden varalta. Lisäksi varmistetaan, etteivät nolla- ja suojajohdin ole vaihtaneet paikkaa keskenään. Mittaukset suoritetaan jännitteettömässä laitteistossa nolla- ja PE-johtimien ollessa erillään. Testaus suoritetaan mittaamalla jännitteelle alttiin osan ja lähinnä olevan pääpotentiaalintasaukseen liitetyn pisteen välinen suojajohtimen resistanssi. (D1-2012, 338)

Mittaus tulee tehdä PE-liittimen ja kunkin suojajohdinpiirin osan väliltä mittausvirralla, joka on välillä 0,2–10 A. Virtalähde on syöttöjännitteestä erotettu, ja sen jännite tulee olla kuormittamattomana 24 V AC tai DC. Hyväksyttävälle mittaustulokselle ei ole tarkkaa raja-arvoa, mutta resistanssiarvon on oltava odotetulla alueella suojajohtimen ominaisuuksiin nähden. (SFS-EN 60204-1)

5.1.2 Eristysresistanssimittaus

Aggregaatille suoritettiin eristysresistanssimittaus, jolla varmistetaan jännitteisten osien riittävä eristys maasta. Eristysresistanssi mitataan kaikkien jännitteisten johtimien ja maadoitusjärjestelmään kytketyn suojajohtimen väliltä asennuksen ollessa jännitteetön. Mahdollinen nolla- ja PE-johtimen yhteys tulee erottaa. Mittaus suoritetaan jännitteettömässä laitteistossa eristysresistanssimittarilla tasajännitteellä. Eristysresistanssin on oltava pääpiirin johtimien ja suojamaadoituspiirin välillä vähintään 1 M Ω koejännitteen ollessa 500 V tasajännitettä. (ST 33, 22; SFS-EN 60204-1)

5.1.3 Tyhjäkäyntiajo

Aggregaatti toimii tyhjäkäynnissä, kun sen tahtigeneraattorin staattori on kuormittamaton eli staattorin virta on nolla (Aura & Tonteri 2005, 346). Tällöin staattorikäämejä lävistävä muuttuva päävuoto indusoi staattorikäämeihin päälähdäjännitteen. Aggregaatille suoritettiin tyhjäkäyntikoe, jonka mittausajaksi valittiin 10 minuuttia. Mittaus suoritettiin sekä aggregaatti maadoitettuna että ilman maadoitusta Fluke 435 Power Quality Analyzer -mittalaitteen Logger-toiminnolla, ja mittauksien tulokset tulostettiin analysointia varten Power Log 3.4 -ohjelmaan.

5.2 Kuormitusmittaukset

Aggregaatille suoritettiin seuraavaksi erilaisia mittauksia, joiden avulla tutkittiin aggregaatin toimintaa ja käyttöturvallisuutta eri kuormitustilanteissa. Mittaukset suoritettiin ilman aggregaatin maadoittamista, koska laitteiston toimintaa todellisissa vikatilanteissa ei tutkittu. Kuormituskokeita suoritettiin myös aggregaatti maadoitettuna, kuten maadoitettujen järjestelmien sähkönsyötössä menetellään. Maadoitusta käytettiin resistiivisen ja epälineaarisen kuormituksen yhteydessä.

5.2.1 Resisttiivinen kuorma

Aggregaatille suoritettiin mittaukset resisttiivisellä kuormalla, jolla mallinnettiin tavallisia pätötehoa kuluttavia kotitalouden sähkölaitteita, kuten lämmityspatteria, sähkökiuasta ja kahvinkeitintä. Resisttiivisen kuorman ottama jännite ja virta ovat keskenään samanvaiheiset. Aggregaattia kuormitettiin resisttiivisen kuormituksen ollessa noin 10 %, 50 % ja 100 % varavoimakoneen nimellistehosta. Mittausaika oli 10 minuuttia ja kuormituksena käytettiin Armeka 230V:n vastuslaitteistoa. Mittauksissa aggregaatti oli maadoitettu ja maadoittamaton. Mittaus suoritettiin Fluke 435 Power Quality Analyzer -mittalaitteen Logger-toiminnolla.

5.2.2 Induktiivinen kuorma

Monet sähkölaitteet kuluttavat pätötehon lisäksi loistehoa, minkä vuoksi tutkittavalle aggregaatille suoritettiin mittaus, jossa sitä kuormitettiin loistehokuormalla. Induktiivista loistehokuormaa mallinnettiin mittauksissa resistanssi- ja kelakuorman yhdistelmällä, jolla pyrittiin tehokertoimen $\cos\phi$ arvoon 0,8. Kuormituksena käytettiin Armekan vastus- ja kelalaitteistoa. Mittauksen pituus oli jälleen 10 minuuttia ja mittaus suoritettiin Fluke 435 Power Quality Analyzer -mittalaitteen Logger-toiminnolla.

5.2.3 Kapasitiivinen kuorma

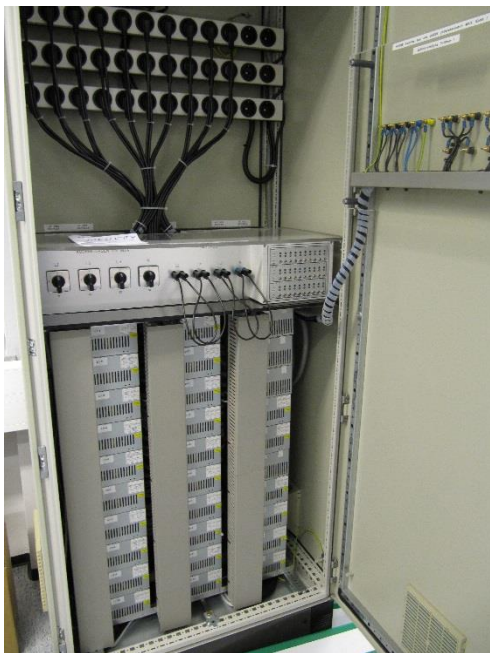
Aggregaatille suoritettiin myös mittaus, jossa mallinnettiin kapasitiivista loistehokuormitusta resistanssi- ja kondensaattorikuorman yhdistelmällä. Kapasitiivisessa kuormassa virta on jännitettä edellä. Mittauksessa pyrittiin tehokertoimen $\cos\phi$ arvoon 0,8, joka muodostettiin Armekan vastus- ja kondensaattorilaitteiston kuormilla. Mittauksen pituus oli 10 minuuttia ja mittaus suoritettiin Fluke 435 Power Quality Analyzer -mittalaitteen Logger-toiminnolla.

5.2.4 Epälineaarinen kuorma

Epälineaariset kuormat, kuten loistelamput ja tietokoneet, ottavat aiemmin esitetyllä tavalla epäsinimuotoista virtaa aiheuttaen ei-toivottuja yliaaltoja. Epälineaarisen kuormituksen vaikutusta aggregaatin toimintaan tutkittiin hakkuriteholähteillä, joita oli käytössä yhteensä kymmenen kappaletta. Taulukossa 4 on mittauksissa käytetyn laitteiston yhden hakkuriteholähteen mittaamalla saadut tehot. Mittauksissa käytetty hakkuriteholähdelaiteisto on esitetty kuvassa 19.

TAULUKKO 4. Yhden hakkuriteholähteen mitatut tehot

Teho	
P (kW)	0,13
S (kVA)	0,16
Q (kVAr)	0,11



KUVA 19. Hakkuriteholähdelaiteisto

Aggregaatille suoritettiin kymmenen mittausta, joissa peruskuormana oli 220 W:n vastus ja kuormitusta lisättiin asteittain, jolloin viimeisessä mittauksessa aggregaatin kuormana oli peruskuorman lisäksi kymmenen hakkuriteholähdettä. Seuraavaksi aggregaatti maadoitettiin, ja mittaus suoritettiin kahdella ja kuudella hakkuriteholähteellä. Mittaukset suoritettiin Fluke 435 Power Quality Analyzer -mittalaitteen Logger-toiminnolla.

5.2.5 Oikosulkukoe

Oikosulkuvirran suuruus on otettava huomioon mitoitettaessa verkon laitteita ja suunniteltaessa oikosulkusuojasta. Vikatilanteen aikana tahtigeneraattori joko syöttää tai ei syötä jatkuvaa oikosulkuvirtaa, mikä vaikuttaa oleellisesti suojalaitteiden valintaan. Aggregaatin toimintaa vikatilanteen aikana tutkittiin oikosulkukokeella, jossa tahtigeneraattori asetettiin napaoikosulkuun. Mittaus tehtiin Agilent Technologies DSO1012A oskilloskoopin avulla.

5.2.6 Kuormitusmuutosmittaukset

Tavallisten kuormitusmittausten lisäksi suoritettiin mittaukset tilanteista, joissa kuormitus muuttuu nopeasti. Mittaukset tehtiin sekä resistiivisellä että epälineaarilla kuor-

malla. Mittauksissa käytettiin Agilent Technologies DSO1012A oskilloskooppia. Resistiivisellä kuormituksella ensimmäisessä mittaustilanteessa kuormitus alkoi noin 10 %:n kuormalla koneen nimellistehosta, jonka jälkeen kuormitusta lisättiin noin 100 %:iin nimellisestä. Sama mittaus suoritettiin toisinpäin vähentämällä kuormitusta noin 100 %:sta noin 10 %:n kuormitukseen. Epälineaarisen kuormituksen tilanteessa tutkimme muutosilmiöitä, joita hakkuriteholähteiden päälle- ja poiskytketyminen aiheuttavat sähkön laadussa. Mittaukset suoritettiin kahden, neljän, kuuden ja kahdeksan hakkuriteholähteen avulla.

5.3 Muut kuormitusmittaukset

Edellä esitettyjen mittausten lisäksi aggregaatin soveltuvuutta testattiin myös muiden kohteiden sähkönsyöttöön. Näitä olivat muun muassa rakennuslämmitin ja KNX-järjestelmän valaistus.

5.3.1 Kiertovesipumput

Ensimmäisessä mittauksessa tutkimme kiertovesipumppujen syöttämistä varavoimalaitteella. Tutkittavana oli Grundfosin kaksi kiertovesipumppua (kuva 20), joiden tekniset tiedot on esitetty taulukoissa 5 ja 6. Kiertovesipumppujen maksimitehot olivat 100 W ja 60 W. Suurempitehoisen pumpun toimintajännitealue oli 230 V–240 V ja pienempitehoisen 230 V. Mittauksissa tutkittiin kiertovesipumppujen päälle- ja poiskytketymisen aiheuttamia muutoksia sähkön laadussa. Mittauksissa käytettiin Agilent Technologies DSO1012A oskilloskooppia.



KUVA 20. Grundfosin kiertovesipumppu

TAULUKKO 5. Grundfos UPF 25–60 kiertovesipumpun tekniset tiedot

Grundfos UPF 25-60		
I _{v1} (A)	P ₁ (W)	
0,44	100	Max.
0,28	40	Min.

TAULUKKO 6. Grundfos UPS 25–40 kiertovesipumpun tekniset tiedot

Grundfos UPS 25-40		
I _{v1} (A)	P ₁ (W)	
0,13	30	Min.
0,20	45	
0,26	60	Max.

5.3.2 Puutarhapumppu

Oikosulkumoottori tarvitsee käynnistyäkseen suuren virran, joten moottoria syöttävä generaattori tulee mitoittaa kuormalaitetta suuremmaksi. Testasimme varavoimalaitteen kykyä suoriutua 810 W:n puutarhapumpun (kuva 21) käynnistämisestä. Mittaus suoritettiin Agilent Technologies DSO1012A oskilloskoopin avulla. Neptun puutarhapumpun tekniset tiedot on esitetty taulukossa 7. Periaatteellinen mittauskytkentä on esitetty liitteessä 3.



KUVA 21. Neptun puutarhapumppu

TAULUKKO 7. Neptun GP 810 puutarhapumpun tekniset tiedot

Neptun GP 810	
P (W)	810
U (V)	230
f (Hz)	50
Q _{max} (l/h)	3600
H _{max} (m)	40
n _o (rpm)	2800

5.3.3 Rakennuslämmitin

Rakennusten lämmitysjärjestelmänä voidaan käyttää öljylämmitystä. Aggregaatin toimintaa tutkittiinkin kuormittamalla sitä rakennuslämmittimellä. Mittauksessa käytettiin Talhu termo 30 rakennuslämmitintä (kuva 22), jonka tekniset tiedot on esitetty taulukossa 8. Talhu termo soveltuu tilapäisiin lämmitystarpeisiin muun muassa rakennustyömaiden, varastojen ja kasvihuoneiden lämmittämiseen. Siirrettävä rakennuslämmitin on varustettu öljypolttimella, ja sen tuottama lämpö siirretään lämmönvaihtimen avulla ulospuhallettavaan ilmaan. Lämmitin toimii säätö- ja varolaitteidensa ohjaamana automaattisesti. (Talhu Oy 2014; Talhu Oy 2004)



KUVA 22. Talhu termo 30 rakennuslämmitin (Talhu Oy 2014)

TAULUKKO 8. Talhu termo 30 öljylämmittimen tekniset tiedot (Talhu Oy 2014)

Talhu termo	30
Lämpöteho	29 kW
Hyötysuhde	90 %
Öljyalaatu	pö talvilaatu
Max kulutus	3,5 l/h
Puhallin	0,20 kW
Ilmamäärä	2800 m ³ /h
Pituus	1270 mm
Leveys	550 mm
Korkeus	880 mm
Paino	92 kg
Pyörät Ø	250 mm
Liitäntäteho	230V/10A

Mittauksessa rakennuslämmittimen puhaltimen sähkönsyöttö otettiin erillisestä kiinteistön sähkökeskuksesta laitteen riittävän jäähtymisen varmistamiseksi. Aggregaatin kuormana oli lämmittimen öljypoltin, jonka toimintaa tutkittiin lisäämällä varavoimalaitteeseen vastus-, kela- ja kondensaattorikuormaa. Mittauksessa käytettiin Fluke 435 Power Quality Analyzer -mittalaitetta.

5.3.4 DALI-valaistuksenohjausjärjestelmä

DALI (Digital Addressable Lighting Interface) on elektronisten liitäntälaitteiden digitaalinen ohjausjärjestelmä. DALI-valaistuksenohjausjärjestelmässä valaisimelle tuodaan vaihe-, nolla- ja suojajohdin sekä digitaaliväylän kaksi johdinta. Mittauksessa aggregaatilla oli tarkoitus syöttää DALI-järjestelmän valaisinta ja etsiä tilanne, jossa jär-

jestelmän toiminta häiriintyy. Aggregaatin kuormana oli DALI-valaisimen lisäksi vastakuormaa, jonka suuruutta lisättiin haettaessa toimintapistettä, jossa valaisimen toiminta voisi estyä. Mittaus suoritettiin Fluke 435 Power Quality Analyzer -mittalaitteella. (Fagerhult 2014)

5.3.5 KNX-automaatiojärjestelmä

Yhä useammissa kiinteistöissä on käytössä älykästä automaatiotekniikkaa, jolla pyritään lisäämään rakennuksen energiatehokkuutta, asuinmukavuutta ja turvallisuutta. KNX-järjestelmä on taloautomaatiojärjestelmä, jolla voidaan ohjata ja hallita muun muassa rakennuksen lämmitystä, ilmastointia ja valaistusta (KNX Finland). Aggregaatin soveltuvuutta KNX-laitteiston sähkönsyöttöön tutkittiin syöttämällä laitteiston valaistusta aggregaatilla. Mittaus tehtiin Fluke 435 Power Quality Analyzer -mittalaitteella.

6 MITTAUSTULOKSET

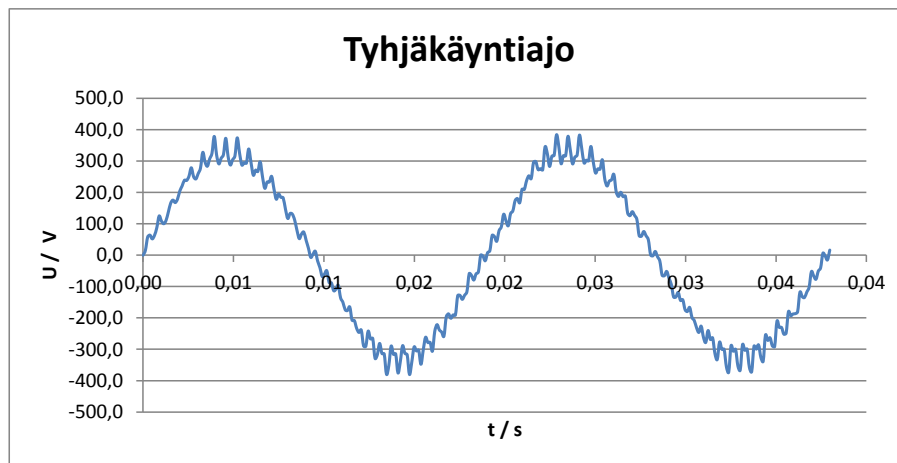
Aggregaatille suoritettujen mittausten tuloksia verrattiin standardissa SFS-EN 50160 esitettyihin sähkön laadun vaatimuksiin. Tässä osiossa käsitellään edellisessä kappaleessa esiteltyjen mittausten tuloksia.

6.1 Generaattorilaitteiston käyttöönottotarkastukset

Aggregaatin suojajohtimen jatkuvuusmittauksessa käytettiin Fluke 1520 MegOhmMeter -mittaria. Mittaus suoritettiin mittaamalla jännitteelle alttiin osan ja lähinnä olevan pääpotentiaalintasaukseen liitetyn pisteen välinen suojajohtimen resistanssi. Resistanssiarvoksi mitattiin $0,2 \Omega$, joten suojajohdinpiiriin voidaan olettaa olevan yhtenäinen ja standardin SFS-EN 60204-1 vaatimusten mukainen.

Eristysresistanssimittaus suoritettiin Fluke 1520 MegOhmMeter -mittarilla, ja koejännitteenä käytettiin 500 V tasajännitettä, jolloin eristysresistanssin tulee olla edellä esitetyn mukaisesti vähintään $1 \text{ M}\Omega$:n suuruinen. Eristysresistanssi mitattiin kaikkien jännitteisten johtimien, eli vaihe- ja nollajohtimien, ja maan väliltä. Resistanssin suuruudeksi saatiin yli $20 \text{ M}\Omega$, joka ylittää standardissa SFS-EN 60204-1 vaaditun arvon. Tuloksen perusteella voidaan todeta, että jännitteiset osat ovat riittävän eristettyjä maasta.

Tyhjäkäyntikokeen aikana aggregaatin akselilla ei ollut kuormitusta. 10 minuutin mittausjakson aikana jännitteen keskiarvo pysyi nimellisarvossaan 230 V:ssa. Taajuuden koko mittausajan keskiarvo pysyi standardissa SFS-EN 50160 erillisverkoille määriteltujen sallittujen rajojen 42,5 Hz–57,5 Hz sisällä. Sen sijaan taajuuden 95 %:n keskiarvo poikkesi sallituista arvoista, jotka standardin mukaan ovat edellä mainitun mukaisesti 49 Hz–51 Hz. Liitteessä 4 on esitelty tarkemmat mittaustulokset. Kuvassa 23 on esitetty jännitekuvaaja aggregaatin tyhjäkäyntitilanteesta. Fluke 435 -mittalaitteesta otetusta jännitekuvaajasta huomataan, että jännite ei ole täysin sinimuotoista.



KUVA 23. Aggregaatin syöttämän jännitteen käyrämuoto tyhjäkäynnissä

Sähkön laatu poikkeaa standardista erityisesti jännitteen kokonaissärökertoimen osalta. Yliaaltoanalyysissä jännitteen kokonaissärökertoimen THD keskiarvo oli noin 8,8 %, joka ylittää standardin SFS-EN 50160 määrittelemän rajan ≤ 8 %. Mittaustulosten mukaan merkittävimmitiksi yliaaltojännitteiksi osoittautuivat kolmas, viides ja seitsemäs yliaalto.

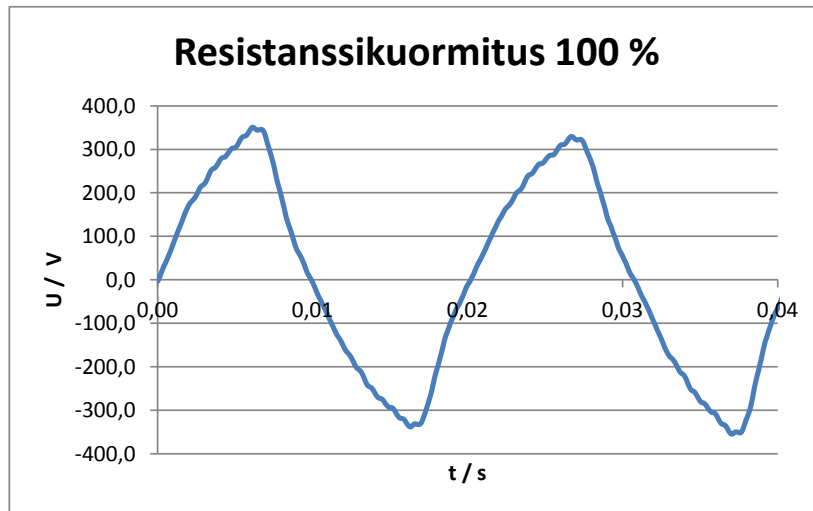
6.2 Kuormitusmittausten tulokset

Kuormitusmittauksissa tarkastelun kohteena olivat jännitetaso, virta, taajuus ja yliaaltojen suuruus, jotka saatiin kätevästi Power Log 3.4 -ohjelmasta. Kuormitusmuutosmittauksissa keskityttiin jännitteen ja virran muutoksiin.

6.2.1 Kuormituskokeiden mittaustulokset

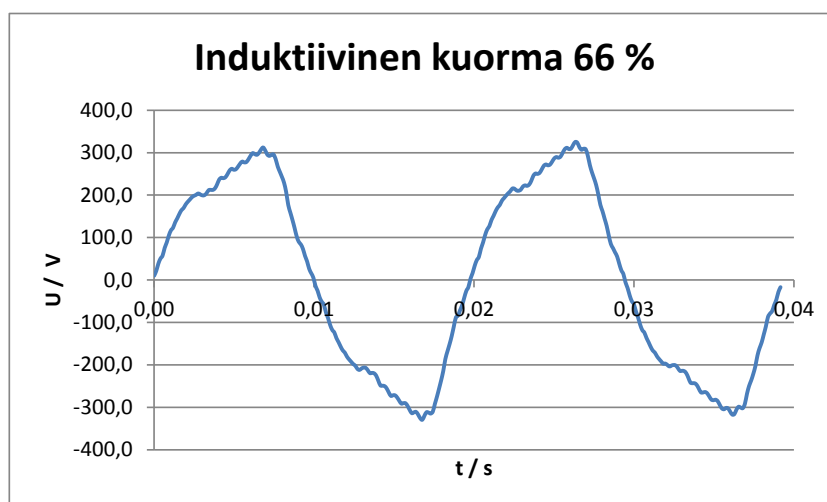
Resistiivisellä kuormalla suoritettiin kolme mittausta kuormituksen ollessa noin 10 %, 50 % ja 100 % nimellisestä 2 kW:n tehosta. Mittaustulosten perusteella jännitteet ja taajuuden 100 %:n keskiarvot pysyivät sallituissa arvoissa. Taajuuden 95 %:n keskiarvot kuitenkin poikkesivat standardissa sallituista rajoista 10 %:n ja 50 %:n kuormituksilla. Yliaaltotarkastelussa 50 %:n ja 100 %:n kuormituksilla jännitteiden kokonaissärökertoimet ylittivät standardin asettamat maksimi-arvot THD:n ollessa noin 12 % ja 13 %. Erityisesti kolmas yliaalto muodostui ongelmaksi näillä kuormituksilla ja ylitti standardin raja-arvon. Merkittävimpien suhteellisten yliaaltojännitteiden osuudet perusaaltoon

nähdessä on esitetty liitteessä 5. Kuvassa 24 on esitetty jännitteen kuvaaja kuormituksen ollessa noin 100 %.



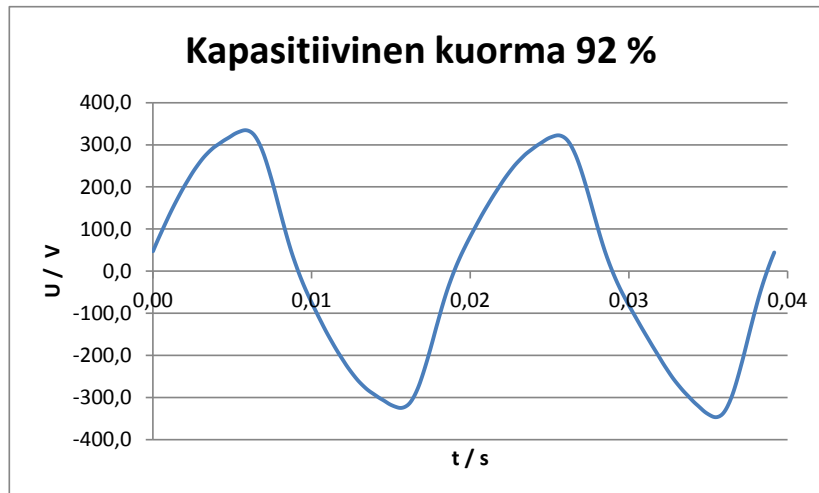
KUVA 24. Aggregaatin syöttämän jännitteen käyrämuoto resistiivisellä kuormituksella

Induktiivisella kuormituksella tehdyssä mittauksessa pyrittiin tehokertoimen $\cos\phi$ arvoon 0,8. Vastus- ja kelakuormien yhdistelmällä tehokertoimeksi saatiin 0,77, jolloin kuormitus oli noin 66 % nimellistehosta. Mittauksen aikana jännitteen ja taajuuden keskiarvot pysyivät sallituissa arvoissa. Jännitteen kolmannen yliaallon osuus ylitti sallitut rajat ja sähkön laatu poikkesi standardista SFS-EN 50160 erityisesti jännitteen kokonaissärön osalta THD:n ollessa noin 17 %. Kuvasta 25 voidaan nähdä jännitteen särötyneisyys. Liitteessä 6 on esitetty tarkemmat mittaustulokset.



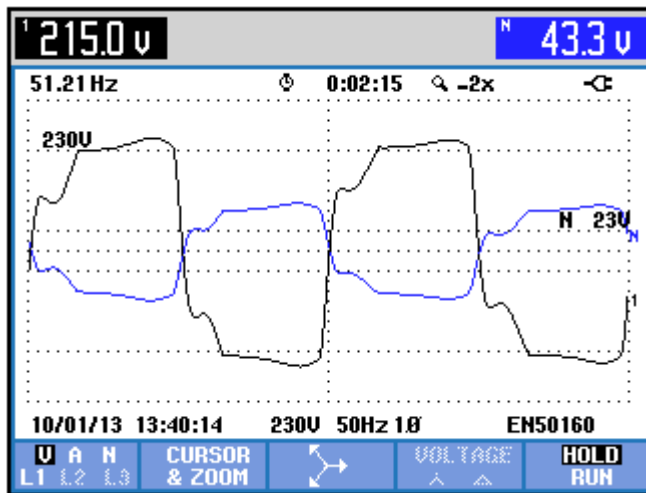
KUVA 25. Aggregaatin syöttämän jännitteen käyrämuoto induktiivisellä kuormituksella

Kapasiitiivisessa kuormitusmittauksessa pyrittiin myös tehokertoimen $\cos\phi$ arvoon 0,8. Kuormituksen ollessa noin 92 % nimellistehosta tehokertoimeksi onnistuttiin saamaan 0,82 vastus- ja kondensaattorikuormien yhdistelmällä. Jännitteen keskiarvo pysyi lähellä nimellisarvoaan, mutta taajuuden 95 %:n keskiarvo poikkesi hieman standardin määrittelemistä raja-arvoista. Sähkön laadussa esiintyi jälleen yliaalto-ongelmia kolmannen yliaallon osuuden kasvaessa sallittujen arvojen yli ja THD:n ollessa noin 12 % (kuva 26). Tarkemmat mittaustulokset on esitetty liitteessä 7.

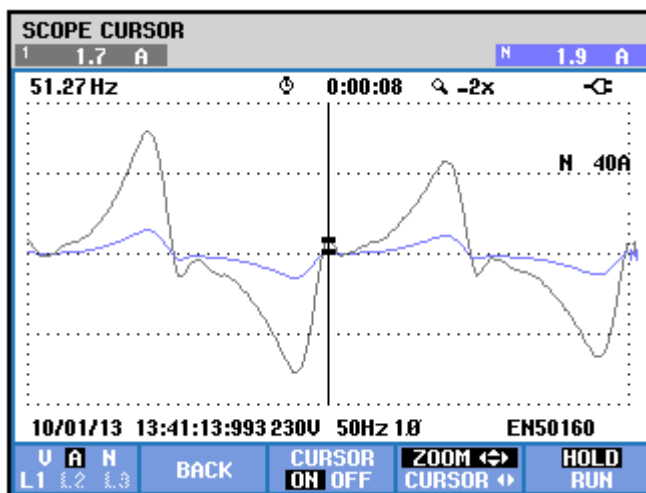


KUVA 26. Aggregaatin syöttämän jännitteen käyrämuoto kapasitiivisella kuormituksella

Epälineaaraisella kuormalla suoritetuissa mittauksissa aggregaatin peruskuormana oli 220 W:n vastus ja hakkuriteholähteiden määrää lisättiin asteittain. Varavoimalaitteen kuormaksi oli mahdollista lisätä yhdeksän hakkuriteholähdettä, jolloin kuormitus oli noin 1905 VA. Mittausjakson taajuuden 95 %:n keskiarvo erosi hyväksytyistä arvoista, kun hakkuriteholähteitä oli yhdestä viiteen. Jokaisessa mittauksessa jännite oli hyvin säröytynyttä ja sähkön laatu poikkesi standardista SFS-EN 50160 yliaaltojen osalta kuormituksen luonteen vuoksi. Jännitteiden yliaalloista 3., 5. ja 7. yliaalto ylittivät standardissa määritellyt rajat. Ensimmäisessä mittauksessa yhden hakkuriteholähteen tilanteessa jännitteen THD-arvo oli noin 18 % ja viimeisessä mittauksessa yhdeksällä hakkuriteholähteellä THD kasvoi lähes 34 %:iin. Jännitteen keskiarvot pysyivät kuitenkin sallituissa arvoissa. Tarkemmat mittaustulokset on esitetty liitteessä 8. Maadoituksella ei ollut suurta vaikutusta tuloksiin. Kuvissa 27 ja 28 on esitetty säröytyneen jännitteen ja virran kuvaajat, kun aggregaatin kuormana oli viisi hakkuriteholähdettä peruskuormineen.

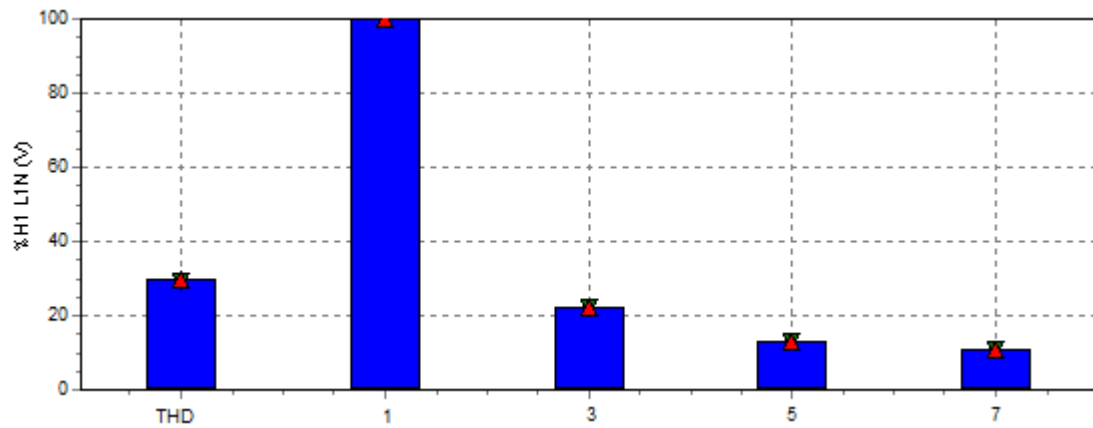


KUVA 27. Aggregaatin syöttämän jännitteen käyrämuoto viidellä hakkuriteholähteellä



KUVA 28. Aggregaatin syöttämän virran käyrämuoto viidellä hakkuriteholähteellä

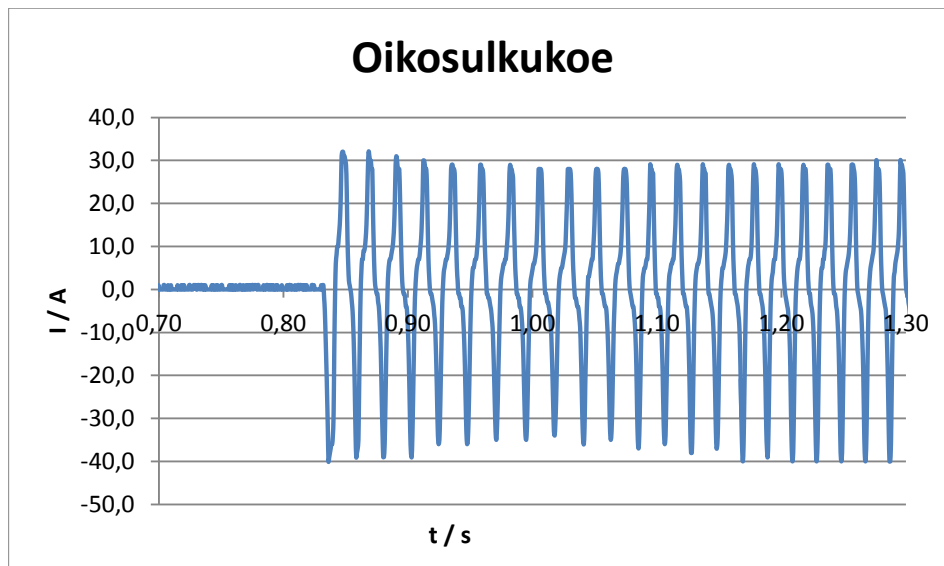
Kuvaajista nähdään, kuinka virta ja jännite poikkeavat selvästi sinimuotoisesta. Kuvassa 29 on esitetty jännitteen THD:n suuruus ja merkittävimmät suhteelliset yliaaltojännitteet perusaaltoon nähden viidellä hakkuriteholähteellä, jolloin kokonaissärökerroin THD oli noin 30 %.



KUVA 29. Jännitteen kokonaissärökerroin THD ja suhteelliset yliaaltojännitteet viidellä hakkuriteholähteellä

6.2.2 Oikosulkukokeen mittaustulokset

Aggregaatille tehdyssä oikosulkukokeessa generaattori syötti jatkuvaa oikosulkuvirtaa, jonka suuruus oli noin 30 A (kuva 30). Varavoimalaitteen oma suojavaite toimi noin 5 sekunnin kohdalla jokaisessa mittauksessa. Suojauksen toimintaa testattiin myös 10 A:n tulppasulakkeella ja 10 A:n B-tyyppin johdonsuojakatkaisijalla. Suojalaitteiden toimintataulukoiden mukaan 10 A:n gG-sulakkeen pienin toimintavirta on 0,4 sekunnin laukaisujalla 82 A ja 5 sekunnin laukaisujalla 46,5 A. B-tyyppin 10 A:n johdonsuojakatkaisijan pienin toimintavirta on 50 A. Oikosulkutilanteissa aggregaatin virta jäi suojavaiteiden toimintavirtoja pienemmäksi. Varavoimalaitteen oma suojavaite toimi tulppasulaketta nopeammin, mutta johdonsuojakatkaisija sen sijaan toimi silloin tällöin. Mittauksissa varavoimalaitteen ylivirtasuojaja toimi kuitenkin aina vikatilanteiden aikana, vaikkei selektiivisyyttä saavutettukaan.



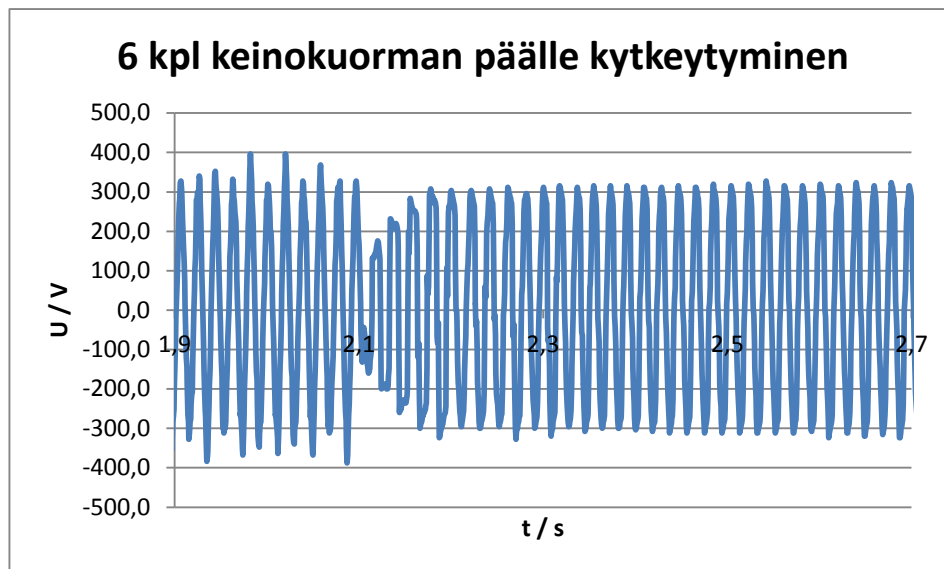
KUVA 30. Aggregaatin syöttämän oikosulkuvirran kuvaaja

Oikosulkuvirran kuvaajaa tarkastelemalla huomataan, että alussa virta ja taajuus hieman laskevat. Muutosilmion jälkeen tilanne kuitenkin tasoittuu taajuuden (pyörimisnopeuden) palatessa ennalleen.

6.2.3 Kuormitusmuutoskokeiden mittaustulokset

Kuormitusmuutosmittauksilla selvitetiin aggregaatin kykyä suoriutua kuormitusten askelmaisista päälle- ja poiskytketyymisistä. Erityisen tarkastelun kohteena olivat mahdolliset kuormitusmuutosten aiheuttamat jännitetason vaihtelut sekä virtapiikit, jotka voivat aiheuttaa ongelmia muille varavoimalaitteen syöttämille laitteille.

Resistiivisellä kuormituksella kuormien askelmainen kytkeytyminen päälle ja pois ei aiheuttanut jännitteen tasossa muutoksia. Sen sijaan epälineaaraisella kuormalla tehdyt kuormitusmuutokset vaikuttivat selvästi jännitetasoon. Hakkuriteholähteiden päällekytkeytyminen sai aikaan jännitteen lyhytaikaisen putoamisen (kuva 31), mikä voi tuottaa ongelmia muille aggregaatin syöttämille herkille laitteille. Kuormituksen kytkeytyminen pois puolestaan aiheutti jännitetason rajun nousun. Liite 9 sisältää kuormitusmuutostilanteiden jännitekuvaajat hakkuriteholähteillä.



KUVA 31. Kuormitusmuutoksen aiheuttama jännitekuoppa

Jännitteen kuvaajassa esiintyy jännitekuopan jälkeinen hakkuriteholähteiden kondensaattoreiden latautuminen. Kuormitusmuutosmittauksista voidaan myös nähdä, että aggregaatti ei sisällä säädintä, joka korjaisi jännitteen suuruudessa tapahtuvia muutoksia. Kestomagnetoidussa tahtigeneraattorissa on vakiomagnetointi, jolloin kuormituksen muuttuessa jännite ei pysy vakiona.

6.3 Muiden kuormitusmittausten tulokset

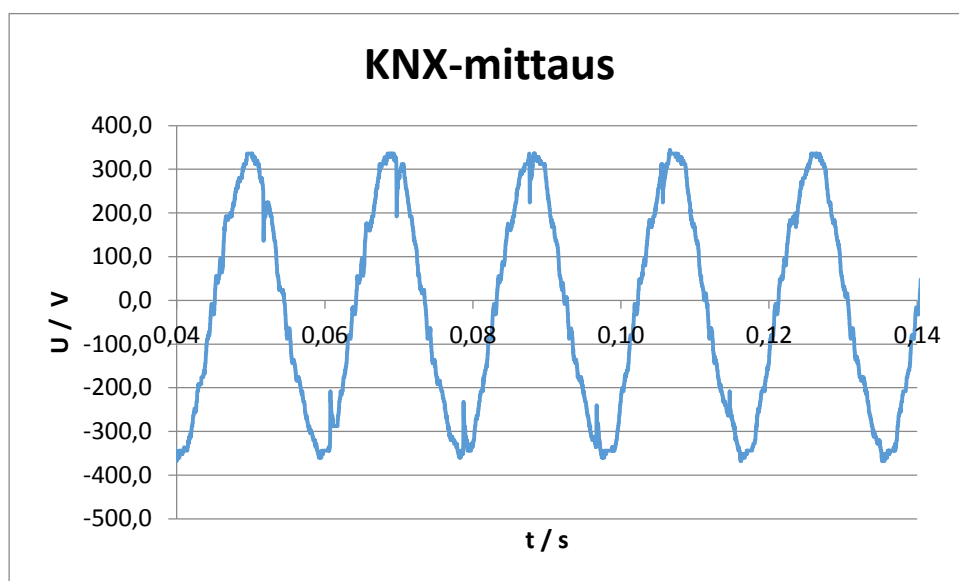
Muissa kuormitusmittauksissa aggregaatin soveltuvuutta testattiin erilaisten järjestelmien sähkön syöttöön. Kiertovesipumpuilla ja puutarhapumpulla tehdyissä mittauksissa testattiin kuormituksen päälle- ja poiskytketyksen aiheuttamia muutoksia sähkön laadussa. Kiertovesipumpuilla kuormitusmuutokset eivät aiheuttaneet muutoksia jännitteen tasossa, koska pumput olivat pienitehoisia aggregaatin nimellistehoön nähden. 810 W:n puutarhapumpun käynnistyminen ja poiskytketyminen sen sijaan näkyi pienenä muutoksena jännitetasossa. Liitteessä 9 on esitetty kuormitusmuutostilanteen jännitekuvaajat.

Rakennuslämmittimellä tehdyssä mittauksessa aggregaatin kuormana oli alussa noin 170 VA. Lämmittimen syötössä ei esiintynyt ongelmia, mutta lisättäessä aggregaatin perään vastus-, kela- ja kondensaattorikuormaa aggregaatin suojaus toimi ylikuormitustilanteessa. Aggregaatin voidaan siis sanoa soveltuvan rakennuslämmittimen sähkön

syöttöön, kunhan puhaltimen toiminta voidaan varmistaa riittävän jäähdytyksen takamiseksi.

DALI-valaistuksenohjausjärjestelmän mittauksessa valaisinta ohjattiin liikusäätimen avulla. Valaisimelle annettujen toimintarajojen mukaan jännitteen tulee olla 220 V–240 V DC ja taajuuden 50 Hz–60 Hz. Valaisin toimi aggregaattisyötössä ongelmitta, ja ohjaus liikusäätimen avulla häiriintyi vasta kuormituksen ylittäessä aggregaatin nimellistehon. Tällöin valaisin sammui, ja sen säätäminen estyi. Mittauksen aikana taajuus vaihteli välillä 42 Hz–52 Hz, ja sen keskiarvo oli noin 47,7 Hz. Ennen kuormituksen lisäämistä jännite oli noin 230 V ja pysyi koko mittauksen ajan alueella 150 V–229,5 V.

KNX-automaatiojärjestelmän mittauksessa tutkittiin aggregaatin soveltuvuutta laitteiston sähkösyöttöön. Laitteiston virtalähde vaatii jännitealueen 230 V + 10 % / - 15 % eli 195,5 V–253 V. Mittauksen alussa jännite oli ilman muuta kuormitusta noin 231 V ja taajuus noin 52,5 Hz. Lisättäessä kuormitusta jännite vaihteli välillä 231,7 V–227 V ja taajuus välillä 49,9 Hz–52,5 Hz. Mittauksen aikana jännite pysyi sallituissa rajoissa, mutta laitteiston valot välkkyivät koko ajan, mikä saattaa johtua taajuuden vaihtelun aiheuttamasta säätimen liipaisukulman muuttumisesta. Laitteiston säätimen tyristori on luultavasti taajuusherkkä ja vaatii toimiakseen tarkan alueen, jolloin aggregaatilla syötettäessä vaihteleva taajuus aiheuttaa järjestelmään häiriöitä. Kuvassa 32 on aggregaatin syöttämän jännitteen kuvaaja KNX-laitteiston syötössä.



KUVA 32. Aggregaatin syöttämän jännitteen kuvaaja KNX-laitteiston sähkön syötössä

7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Työssä tutkittiin 1-vaiheisen varavoimalaitteen käyttöturvallisuutta ja tarkasteltiin aggregaatin tuottaman sähkön laatua.

Varavoimalaitteelle suoritettujen mittausten perusteella voidaan todeta, että tutkittava laite ei aiheuttanut varsinaisia sähköturvallisuusriskejä. Sen sijaan aggregaatin tuottaman sähkön laadussa esiintyi puutteita, sillä se ei täyttänyt kaikilta osin standardin SFS-EN 50160 vaatimuksia. Ongelmaksi muodostui erityisesti jännitteen säröytyneisyys, joka voi aiheuttaa ongelmia herkissä laitteissa, jotka vaativat pienisäröisen vaihejännitteen. Taajuuden 95 %:n keskiarvot poikkesivat joissakin mittauksissa standardin määrittelemistä raja-arvoista. Kuormitusmuutoksissa epälineaarisen kuormituksen askelmaiset päälle- ja poiskeytyymiset johtivat jännitteen lyhytaikaiseen putoamiseen ja kasvamiseen, mikä voi häiritä muita aggregaatin syöttämiä sähkölaitteita.

Oikosulku- ja ylikuormitustilanteen aikana aggregaatti toimi vaatimusten mukaisesti suorittaen syötön automaattisen poiskeytyksen. Suojaus toimi kuitenkin melko hitaasti, viidessä sekunnissa. Kiinteää sähköasennusta syöttäessä kiinteistön suojalaitteet eivät välttämättä ehdi toimimaan vikatilanteessa, mutta mittausten perusteella varavoimalaitteen ylivirtasuojan voidaan todeta suorittavan suojauksen, vaikkei selektiivisyyttä saavutettaisikaan.

Autobil FP2500 -aggregaatin käyttöohjeen mukaan laite soveltuu koti- ja matkailukäyttöön sekä varavoiman tuotantoon muun muassa valaisimille, kodinkoneille ja elektroniikkalaitteille. Mittaustulosten perusteella voidaan kuitenkin kyseenalaistaa laitteen soveltuvuus herkkien elektroniikkalaitteiden sähkön syöttöön. Aggregaatin voidaan todeta olevan soveltumaton myös KNX-laitteiston sähkön syöttöön, mutta kuluttaja ei välttämättä käyttäisikään varavoimalaitetta kyseiseen käyttöön.

Aggregaatin käyttöohjeet eivät sisältäneet tietoa sähkögeneraattorin tyyppistä, joten mittaustulosten perusteella varavoimalaitteen oletettiin olevan kestopagnetoitu tahtikone, jossa ei ole säädintä. Käyttöohjeen voidaan todeta olevan puutteellinen myös maadoitusohjeen perusteella. Maadoitukseen ohjeistava kuva ei ole välttämättä riittävä turvallisen maadoituksen tekoon.

Yhteenvetona voidaan todeta, että kuluttajia tulisi ohjeistaa enemmän varavoiman turvalliseen käyttöön. Saatavilla on erihintaisia ja -laatuisia varavoimalaitteita, eikä halvin tuote ole välttämättä turvallisin. Laittevalmistajien olisi tarpeellista ilmoittaa käyttöohjeissaan aggregaatin tarkat käyttökohteet sekä laitteen syöttämän oikosulkuvirran suuruus ja sallittu kestoaika, jotta suojauksen toiminta voitaisiin suunnitella kiinteää asennusta syötettäessä. Sähköasennuksissa olisi myös hyvä huomioida jo suunnitteluvaiheessa varavoiman liittämismahdollisuus, jolla varmistettaisiin aggregaatin ja kiinteän asennuksen yhteensopivuus.

LÄHTEET

ABB. 1999. Kolmannen yliaallon opas. ABB Control Oy.
[http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT209.nsf/VerityDisplay/2857AF09DDA38FF8C1256C5500269598/\\$File/THFOP-FI.pdf](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT209.nsf/VerityDisplay/2857AF09DDA38FF8C1256C5500269598/$File/THFOP-FI.pdf)

ABB. 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita. 10.painos. Vaasa: Ykkös - Offset Oy.

ABB. 2001. Tekninen opas nro 6. Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas. ABB Automation Group.
[http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/\\$file/tekninen_opas_nro_6.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/$file/tekninen_opas_nro_6.pdf)

Aura, L. & Tonteri, A. 2005. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. 3.-5. painos. Helsinki: WSOY.

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. Sähköverkot 1. Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. 1. painos. Helsinki: Otatieto.

Energiateollisuus ry. Lehdistötiedote. Loppuvuoden sähkökatkoista kärsi 570 000 asiakasta. Päivitetty 19.1.2012.
<http://energia.fi/ajankohtaista/lehdistotiedotteet/loppuvuoden-sahkokatkoista-karsi-570-000-asiakasta>

Fagerhult. Valonsäätö. DALI-osoitteellinen digitaaliohjaus. Luettu 8.2.2014.
http://www.fagerhult.fi/indoor/planering/technical-info/pdf/Valonsaato_12.pdf

Fluke. Fluke 435 -sarjan sähkönlaatu- ja energia-analysaattori. Luettu 8.2.2014.
<http://www.fluke.com/fluke/fifi/sahkonlaatutyokalut/kolmivaiheinen/fluke-435-series-ii.htm?PID=73939>

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

Hietalahti, L. 2012. Säädettyt sähkömoottorikäytöt. 1.painos. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.

Hietalahti, L. 2013. Sähkövoimatekniikan perusteet. 1.painos. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.

Korpinen, L., Mikkola, M., Keikko, T. & Falck, E. Yliaalto-opus. Luettu 5.11.2013.
<http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/ylialto-opus.pdf>

KNX Finland. KNX:n hyödyt. Luettu 18.1.2014.
<http://www.knx.fi/index.php?k=220476>

Mörsky, J. & Mörsky J. 1994. Voimalaitosten yhteiskäytön tekniikka. Helsinki: Otatieto.

Oulun Seudun Sähkö. Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet. Luettu 6.10.2013. <https://www.oulunseudunsahko.fi/Sahkoverkko/Sahkohairiot/Sahkonlaatu/Jakelujannitteen-ominaisuudet>

Pakonen, P. & Verho, P. 2013. Varavoima ja sähköturvallisuus. TTY Sähköenergiatekniikka. Tutkimussuunnitelma.

SFS-EN 50160. Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet. 4. painos. Julkaistu 23.5.2011. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 60204-1. Koneturvallisuus. Koneiden sähkölaitteisto. Osa 1: Yleiset vaatimukset. 3. painos. Julkaistu 26.3.2007. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

ST 52.15. Loistehon kompensointi pienjänniteverkossa (UN < 1000 V). Laadittu 15.12.2004. Espoo: Sähköinfo Oy.

ST 52.40. Siirrettävän, pienijännitteisen moottorigeneraattorin liittäminen sähkölaitteistoon. Laadittu 15.11.2012, Espoo: Sähköinfo Oy.

STEK - Sähköturvallisuuden edistämiskeskus. Sähköä aggregaatista. Luettu 30.9.2013. http://www.sahkoturva.info/sahkon_kaytto_kotona/sahkoa_monessa_muodossa/fi_FI/sahkoa_aggregaatista/

Sähköinfo Severi. Koneiden käyttöönottotarkastus. Julkaistu 14.8.2007. <http://severi.sahkoinfo.fi.elib.tamk.fi/item/2095?search=kone>

Sähköinfo Severi. 2012. ST-käsikirja 33 Rakennusten sähköasennusten tarkastukset. 3. uusittu painos. Espoo: Sähköinfo Oy.

Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry. 2006. Yliaallot ja kompensointi. Tampere: Tammer - Paino Oy.

Talhu Oy. 2004. Termo 30 käyttöohje (2/04).

Talhu Oy. 2014. TALHU termo siirrettävät öljylämmittimet. Luettu 19.1.2014. <http://www.talhu.fi/fi/Tuotteet/Energia%20ja%201%C3%A4mp%C3%B6/Rakennusl%C3%A4mmitin/Talhu%20Termo%20%C3%B6ljyl%C3%A4mmittimet/>

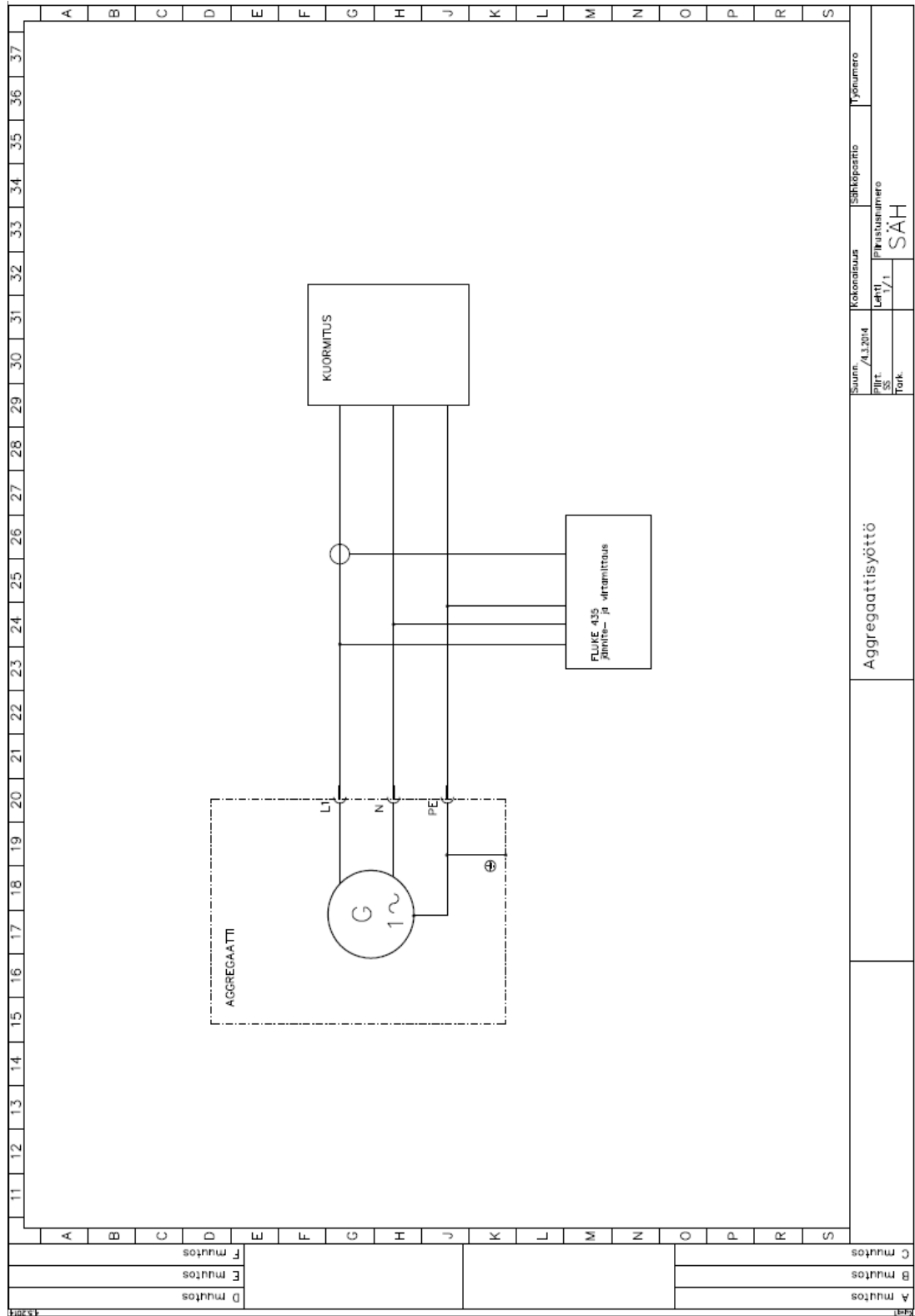
Virtuaali ammattikorkeakoulu. Rakennuksen sähköverkko: Jakelujärjestelmät. Luettu 27.12.2013.

<http://www2.amk.fi/digma.fi/www.amk.fi/opintojaksot/030503/1113391235042/1150107031700/1150107977837/1150110228558.html>

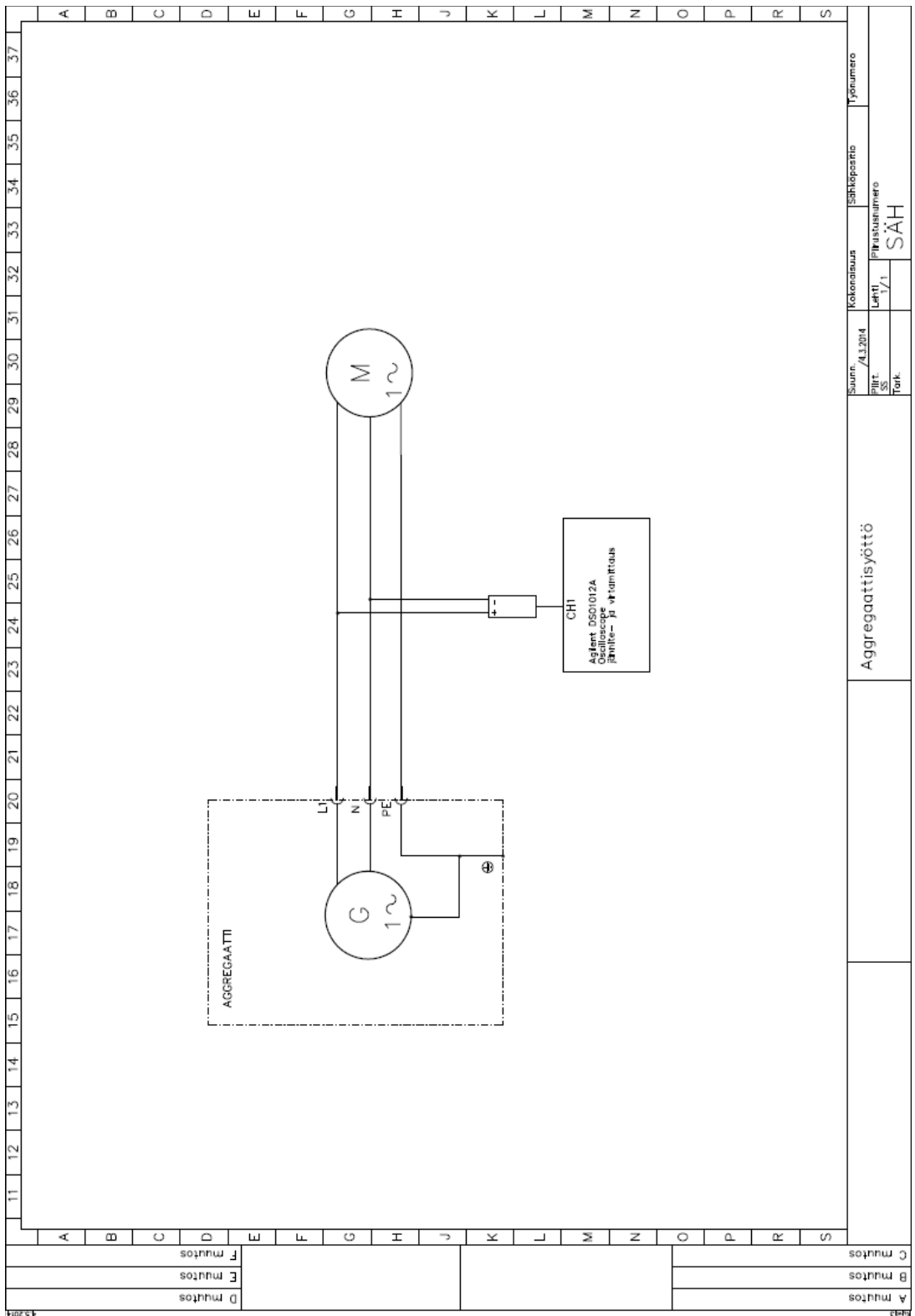
Virtuaali ammattikorkeakoulu. Sähköverkon kompensointi. Luettu 3.1.2014. <http://www2.amk.fi/digma.fi/www.amk.fi/opintojaksot/030503/1134045922435/1134046524532/1134046634756/1134046693839.html>

LIITTEET

Liite 1. Mittauskytkennän piirikaavio 1

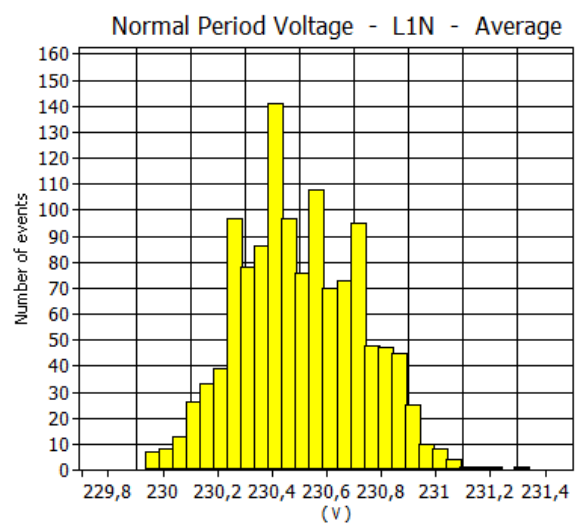
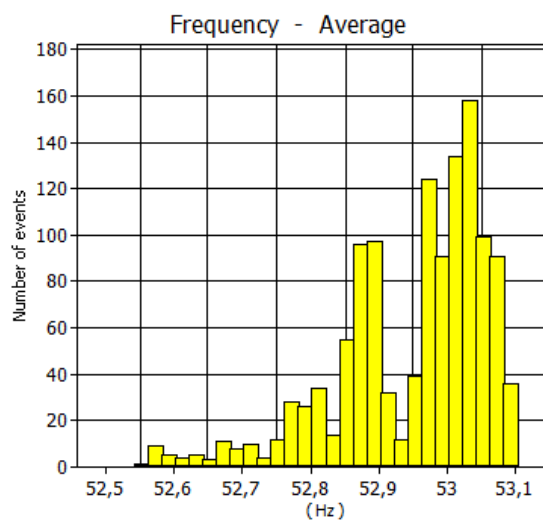
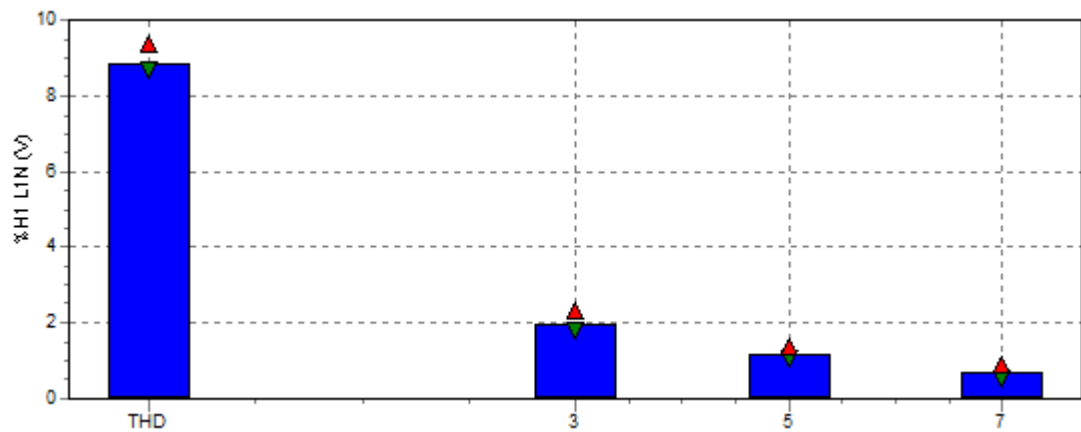


Liite 3. Mittauskytkennän piirikaavio puutarhapumpun syötössä



Liite 4. Mittaustulokset tyhjäkäynnissä

Tyhjäkäyntiajo	
Mittaustilanne	Tyhjäkäyntiajo
Sähköinen kuormitus tilanne	Ei kuormaa
Mittaukset	10 min sähkön nahoitus virta, taajuus, vaihejännite
Tuloksia	Jännitetaso keskiarvo 230 V Taajuus keskiarvo 52,94 Hz
Havainnot	Sähkön laatu poikkeaa standardista EN50160: THD ka 8,81; taajuus 95 % viikosta 53 Hz

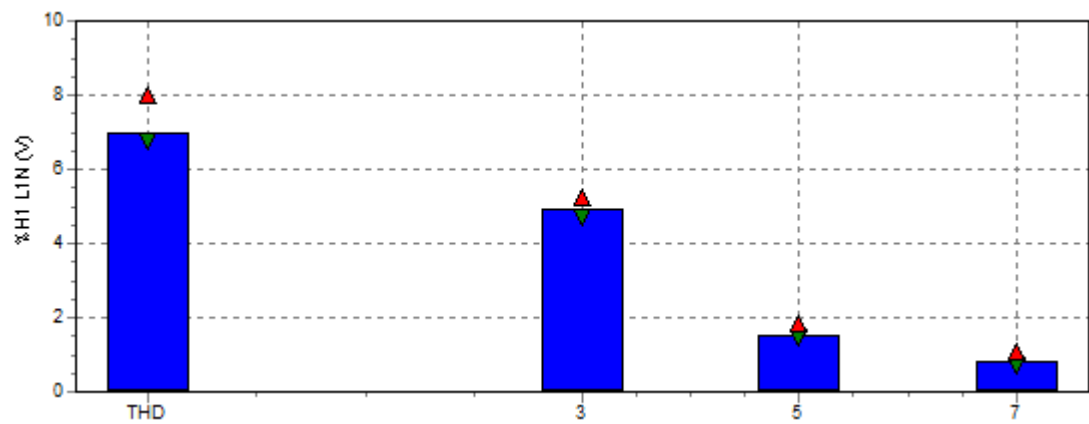


Liite 5. Mittaustulokset resistiivisellä kuormalla

Mittaustulokset 10 %:n kuormituksella.

1 (3)

Staattinen kuormitus 10%	
Mittaustilanne	Resistiivinen kuorma 11 % nimellisestä
Sähköinen kuormitus tilanne	Teho 216 W
Mittaukset	10 min sähkön nahoitus virta, taajuus, vaihejännite
Tuloksia	Jännitetaso keskiarvo 229 V Taajuus keskiarvo 52,29 Hz Virta keskiarvo 0,93 A PF 1; DPF 1
Havainnot	Sähkön laatu poikkeaa standardista EN50160 taajuus 95 % viikosta

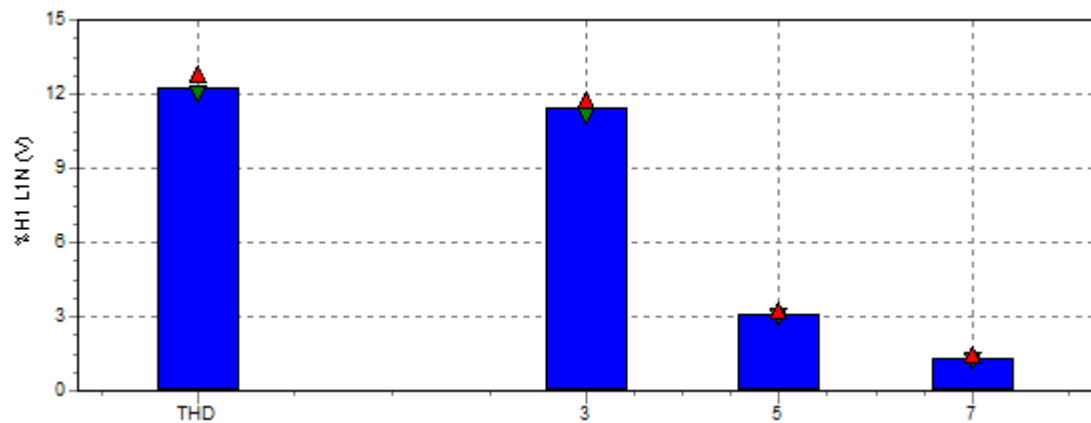


(jatkuu)

Mittaustulokset 47 %:n kuormituksella.

2(3)

	Staattinen kuormitus 50%
Mittaustilanne	Resistiivinen kuorma 47 % nimellisestä
Sähköinen kuormitustilanne	Teho 945 W
Mittaukset	10 min sähkön nahoitus virta, taajuus, vaihejännite
Tuloksia	Jännitetaso keskiarvo 229 V Taajuus keskiarvo 51,49 Hz Virta keskiarvo 4,13 A PF 1; DPF 1
Havainnot	Sähkön laatu poikkeaa standardista EN50160 THD:n osalta: THD ka 12,27 (3.ylialto); taajuus 95 % viikosta

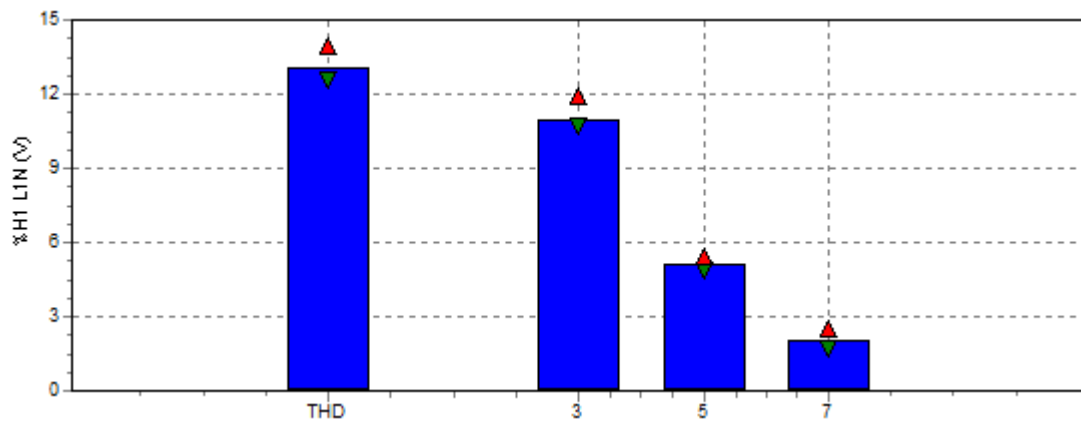


(jatkuu)

Mittaustulokset 96 %:n kuormituksella.

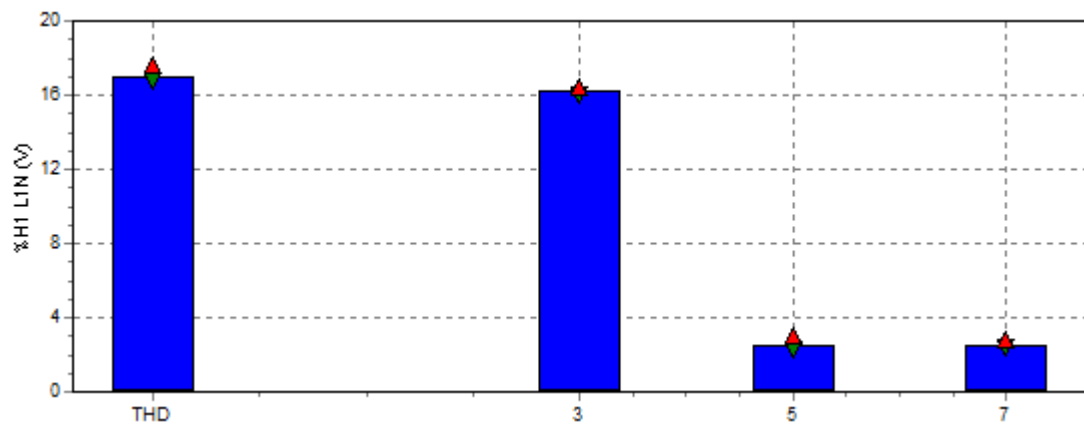
3 (3)

	Staattinen kuormitus 100%
Mittaustilanne	Resistiivinen kuorma 96 % nimellisestä
Sähköinen kuormitus tilanne	Teho 1911 W
Mittaukset	10 min sähkön nahoitus virta, taajuus, vaihejännite
Tuloksia	Jännitetaso keskiarvo 221 V Taajuus keskiarvo 49,18 Hz Virta keskiarvo 8,66 A PF 1; DPF 1
Havainnot	Sähkön laatu poikkeaa standardista EN50160 THD:n osalta: THD ka 13,02 (3.yliaalto)

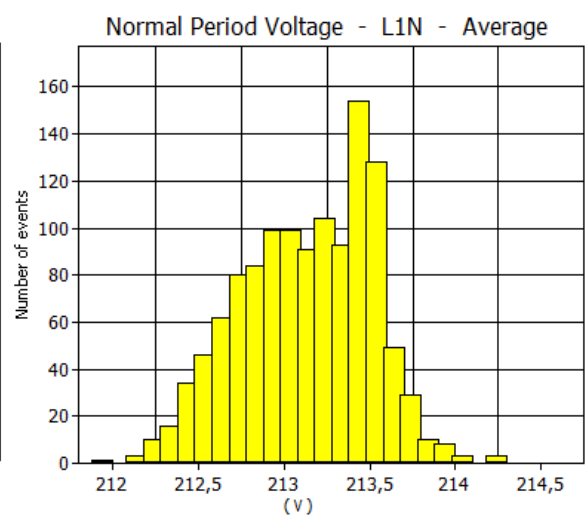
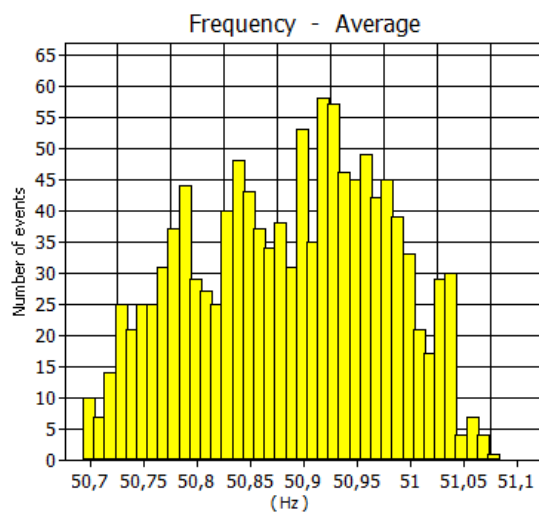


Liite 6. Mittaustulokset induktiivisella kuormalla

	Induktiivinen kuorma $\cos\varphi$ 0,8
Mittaustilanne	Induktiivinen kuorma 66 % nimellisestä
Sähköinen kuormitustilanne	Reaktiivinen kuorma Teho 1311 VA, 823 VAR, 1020 W
Mittaukset	10 min sähkön nahoitus virta, taajuus, vaihejännite
Tuloksia	Jännitetaso keskiarvo 213,08 V Taajuus keskiarvo 50,88 Hz Virta keskiarvo 6,16 A PF 0,78; DPF 0,77
Havainnot	Sähkön laatu poikkeaa standardista EN50160 THD:n osalta: THD ka 16,93 (3.yliaalto)

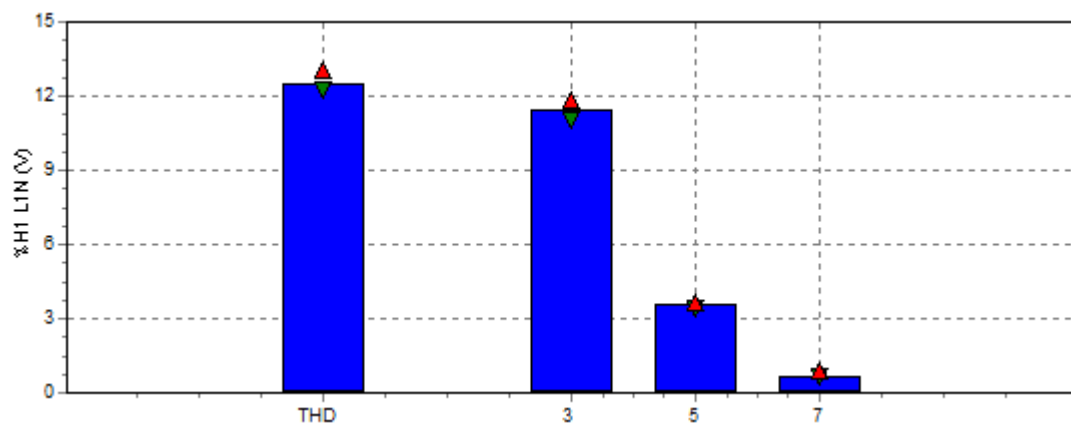


Jännitteen kokonaissärökerroin THD ja suhteelliset yliaaltojännitteet.

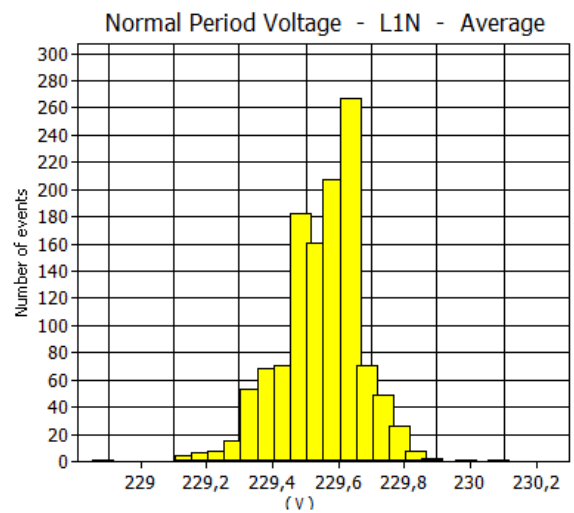
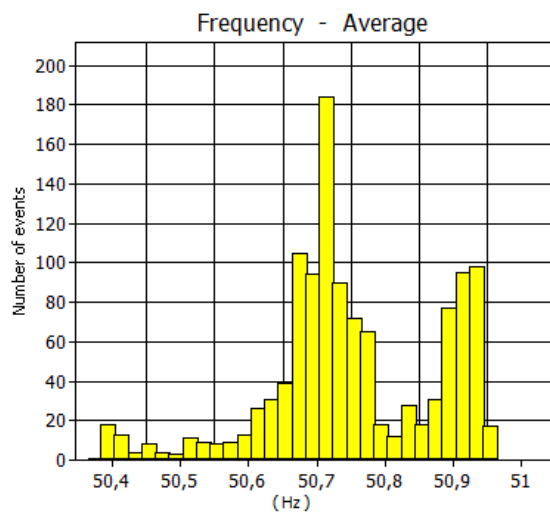


Liite 7. Mittaustulokset kapasitiivisella kuormalla

Kapasiitiivinen kuorma $\cos\phi$ 0,8	
Mittaustilanne	Kapasiitiivinen kuorma 92 % nimellisestä
Sähköinen kuormitustilanne	Reaktiivinen kuorma Teho 1832 VA, 1091 VAr, 1470 W
Mittaukset	10 min sähkön nahoitus virta, taajuus, vaihejännite
Tuloksia	Jännitetaso keskiarvo 229,53 V Taajuus keskiarvo 50,74 Hz Virta keskiarvo 7,97 A PF 0,8; DPF 0,82
Havainnot	Sähkön laatu poikkeaa standardista EN50160 THD:n osalta: THD ka 12,27 (3.yliaalto); taajuus 95 % viikosta poikkeaa hieman



Jännitteen kokonaissärökerroin THD ja suhteelliset yliaaltojännitteet.



Liite 8. Mittaustulokset epälineaarisella kuormalla

1 (2)

	Epälineaarinen kuorma 1kpl	Epälineaarinen kuorma 2kpl	Epälineaarinen kuorma 3kpl
Mittaustilanne	Epälineaarinen kuorma 1kpl ja 220 W peruskuorma	Epälineaarinen kuorma 2kpl ja 220 W peruskuorma	Epälineaarinen kuorma 3kpl ja 220 W peruskuorma
Sähköinen kuormitustilanne	Epälineaarinen kuorma Teho 486 VA, 175 VAR, 445 W	Epälineaarinen kuorma Teho 646 VA, 283 VAR, 577 W	Epälineaarinen kuorma Teho 809 VA, 402 VAR, 702 W
Mittaukset	10 min sähkön nahoitus virta, taajuus, vaihejännite	10 min sähkön nahoitus virta, taajuus, vaihejännite	10 min sähkön nahoitus virta, taajuus, vaihejännite
Tuloksia	Jännitetaso keskiarvo 226 V Taajuus keskiarvo 52,08 Hz Virta keskiarvo 2,14 A PF 0,93; DPF 1	Jännitetaso keskiarvo 223 V Taajuus keskiarvo 52,25 Hz Virta keskiarvo 2,88 A PF 0,89; DPF 0,98	Jännitetaso keskiarvo 219 V Taajuus keskiarvo 51,73 Hz Virta keskiarvo 3,68 A PF 0,87; DPF 0,97
Havainnot	Sähkön laatu poikkeaa standardista EN50160 THD:n osalta: THD ka 17,54 (3. ja 5.yliaalto); taajuus 95 % viikosta	Sähkön laatu poikkeaa standardista EN50160 THD:n osalta: THD ka 21,84 (3, 5 ja 7.yliaalto); taajuus 95 % viikosta	Sähkön laatu poikkeaa standardista EN50160 THD:n osalta: THD ka 24,71 (3, 5 ja 7.yliaalto); taajuus 95 % viikosta

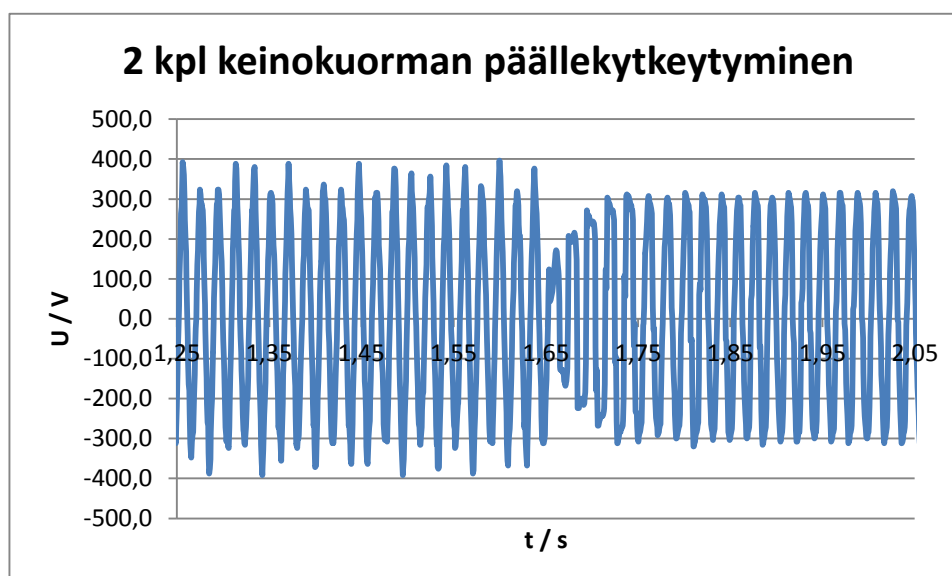
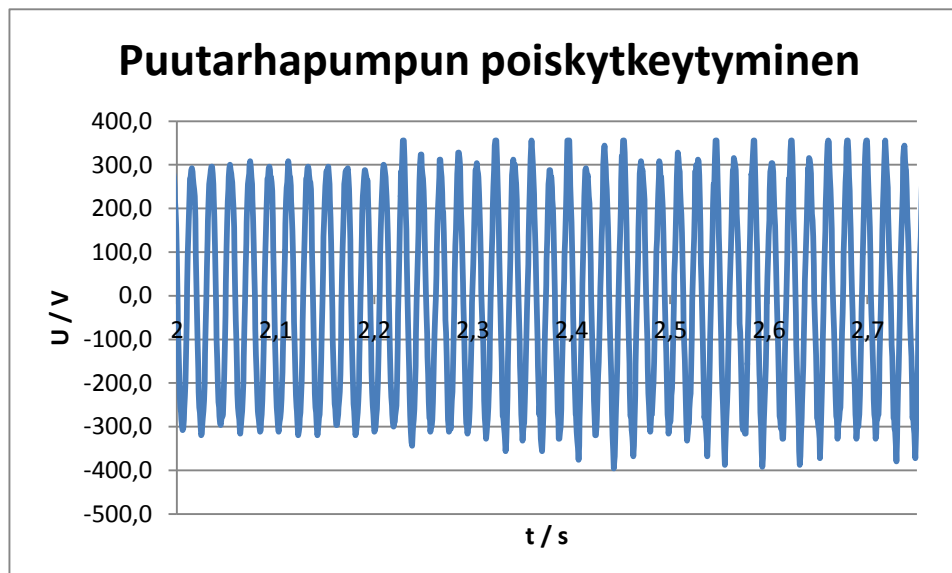
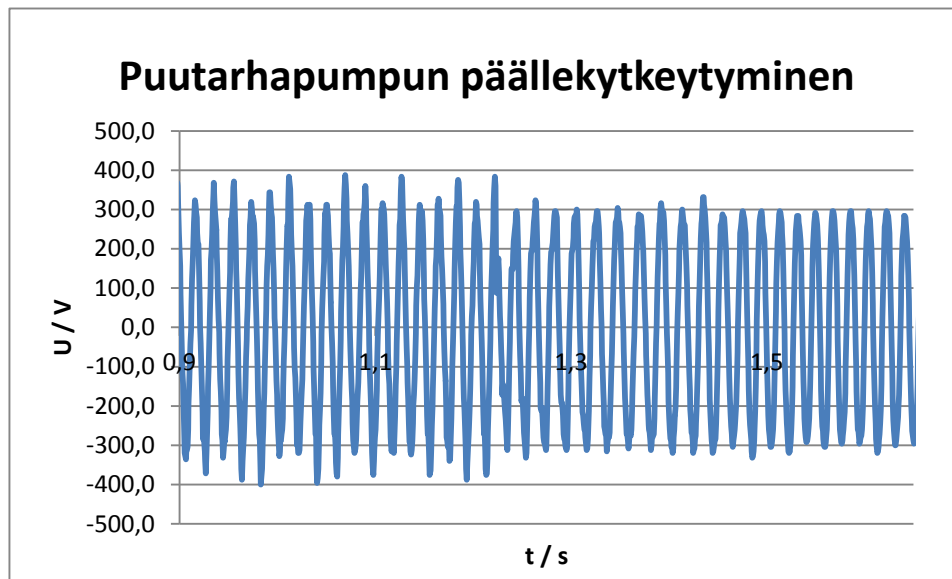
	Epälineaarinen kuorma 4kpl	Epälineaarinen kuorma 5kpl	Epälineaarinen kuorma 6kpl
Mittaustilanne	Epälineaarinen kuorma 4kpl ja 220 W peruskuorma	Epälineaarinen kuorma 5kpl ja 220 W peruskuorma	Epälineaarinen kuorma 6kpl ja 220 W peruskuorma
Sähköinen kuormitustilanne	Epälineaarinen kuorma Teho 973 VA, 512 VAR, 836 W	Epälineaarinen kuorma Teho 1160 VA, 634 VAR, 971 W	Epälineaarinen kuorma Teho 1338 VA, 742 VAR, 1118 W
Mittaukset	10 min sähkön nahoitus virta, taajuus, vaihejännite	10 min sähkön nahoitus virta, taajuus, vaihejännite	10 min sähkön nahoitus virta, taajuus, vaihejännite
Tuloksia	Jännitetaso keskiarvo 217 V Taajuus keskiarvo 51,47 Hz Virta keskiarvo 4,50 A PF 0,85; DPF 0,96	Jännitetaso keskiarvo 215 V Taajuus keskiarvo 51,37 Hz Virta keskiarvo 5,40 A PF 0,84; DPF 0,95	Jännitetaso keskiarvo 213 V Taajuus keskiarvo 50,95 Hz Virta keskiarvo 6,28 A PF 0,83; DPF 0,94
Havainnot	Sähkön laatu poikkeaa standardista EN50160 THD:n osalta: THD ka 27,11 (3, 5 ja 7.yliaalto); taajuus 95 % viikosta	Sähkön laatu poikkeaa standardista EN50160 THD:n osalta: THD ka 29,52 (3, 5 ja 7.yliaalto); taajuus 95 % viikosta	Sähkön laatu poikkeaa standardista EN50160 THD:n osalta: THD ka 30,32 (3, 5 ja 7.yliaalto)

(jatkuu)

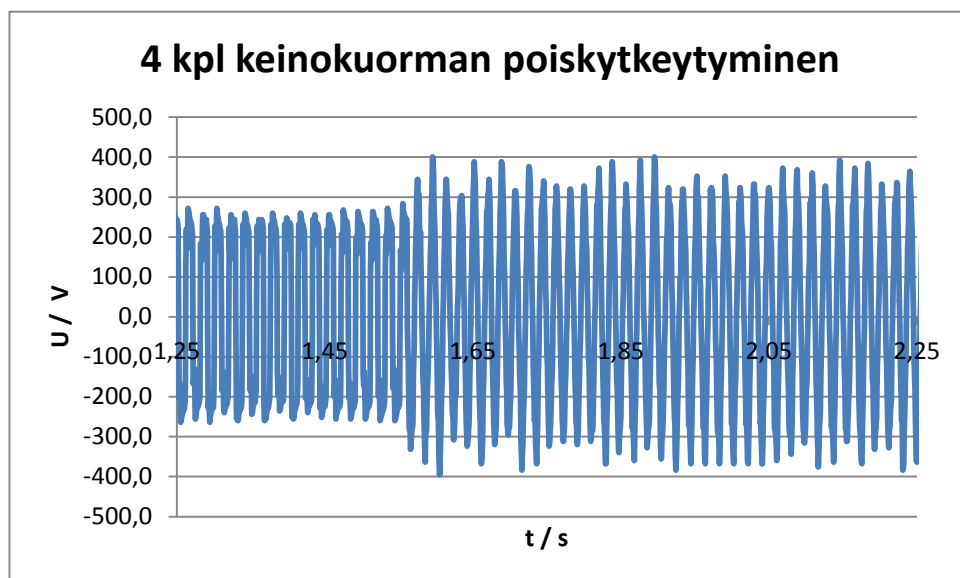
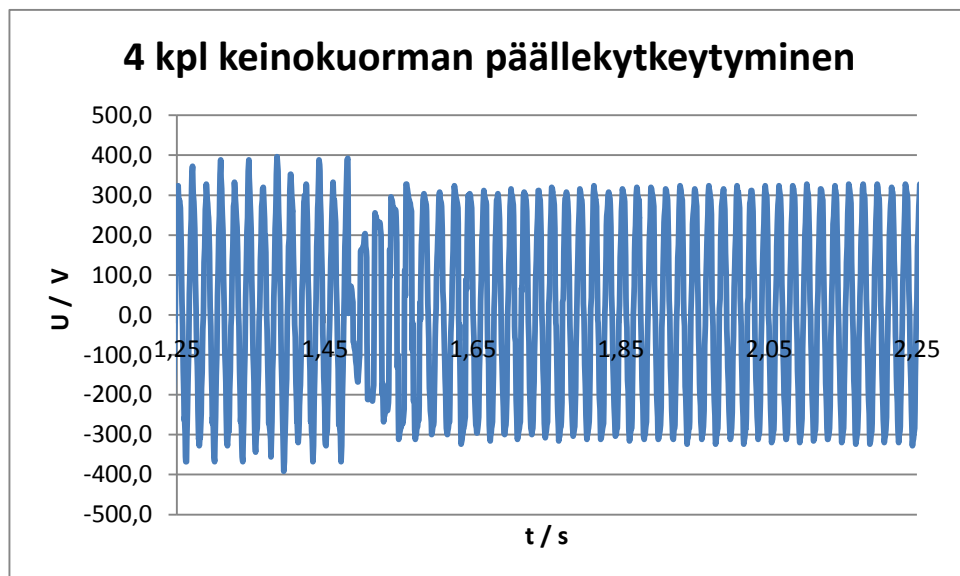
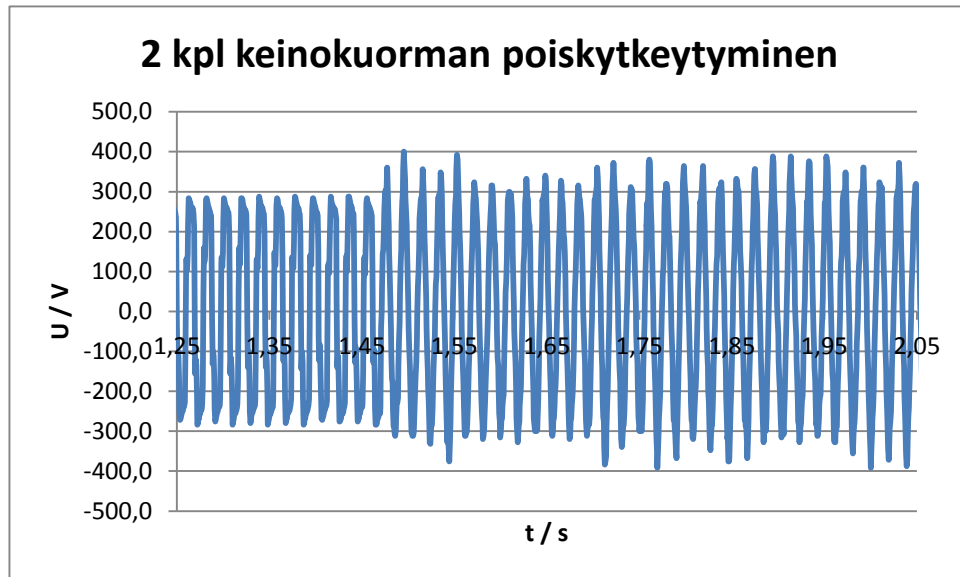
	Epälineaarinen kuorma 7kpl	Epälineaarinen kuorma 8kpl	Epälineaarinen kuorma 9kpl
Mittaustilanne	Epälineaarinen kuorma 7kpl ja 220 W peruskuorma	Epälineaarinen kuorma 8kpl ja 220 W peruskuorma	Epälineaarinen kuorma 9kpl ja 220 W peruskuorma
Sähköinen kuormitustilanne	Epälineaarinen kuorma Teho 1533 VA, 863 VAR, 1267 W	Epälineaarinen kuorma Teho 1711 VA, 971 VAR, 1403 W	Epälineaarinen kuorma Teho 1905 VA, 1089 VAR, 1564 W
Mittaukset	10 min sähkön nahoitus virta, taajuus, vaihejännite	10 min sähkön nahoitus virta, taajuus, vaihejännite	10 min sähkön nahoitus virta, taajuus, vaihejännite
Tuloksia	Jännitetaso keskiarvo 212 V Taajuus keskiarvo 50,43 Hz Virta keskiarvo 7,21 A PF 0,83; DPF 0,94	Jännitetaso keskiarvo 210 V Taajuus keskiarvo 50,41 Hz Virta keskiarvo 8,12 A PF 0,82; DPF 0,94	Jännitetaso keskiarvo 210 V Taajuus keskiarvo 49,91 Hz Virta keskiarvo 9,08 A PF 0,82; DPF 0,93
Havainnot	Sähkön laatu poikkeaa standardista EN50160 THD:n osalta: THD ka 31,36 (3, 5 ja 7.ylialto)	Sähkön laatu poikkeaa standardista EN50160 THD:n osalta: THD ka 32,23 (3, 5 ja 7.ylialto)	Sähkön laatu poikkeaa standardista EN50160 THD:n osalta: THD ka 33,58 (3, 5 ja 7.ylialto)

Liite 9. Mittaustuloksia kuormitusmuutoksista

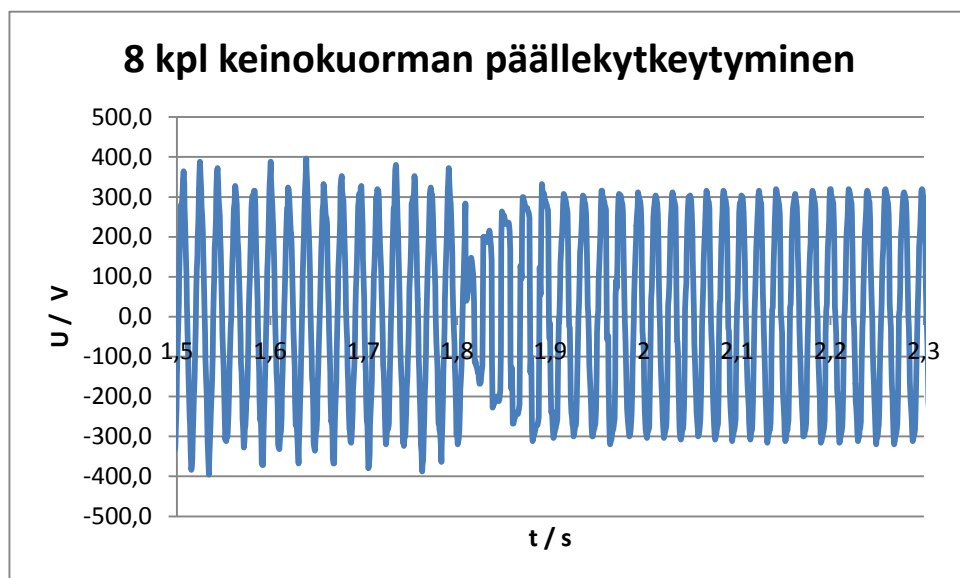
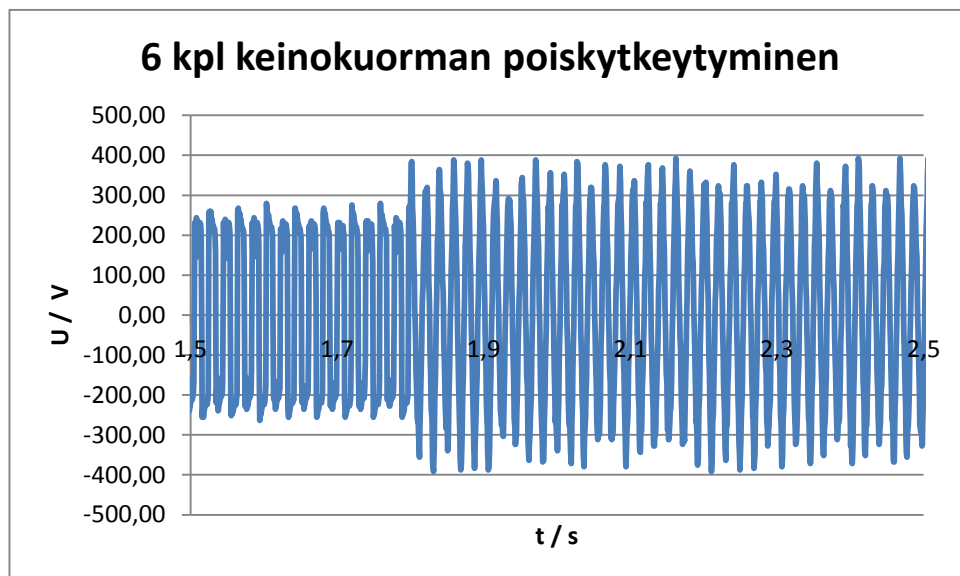
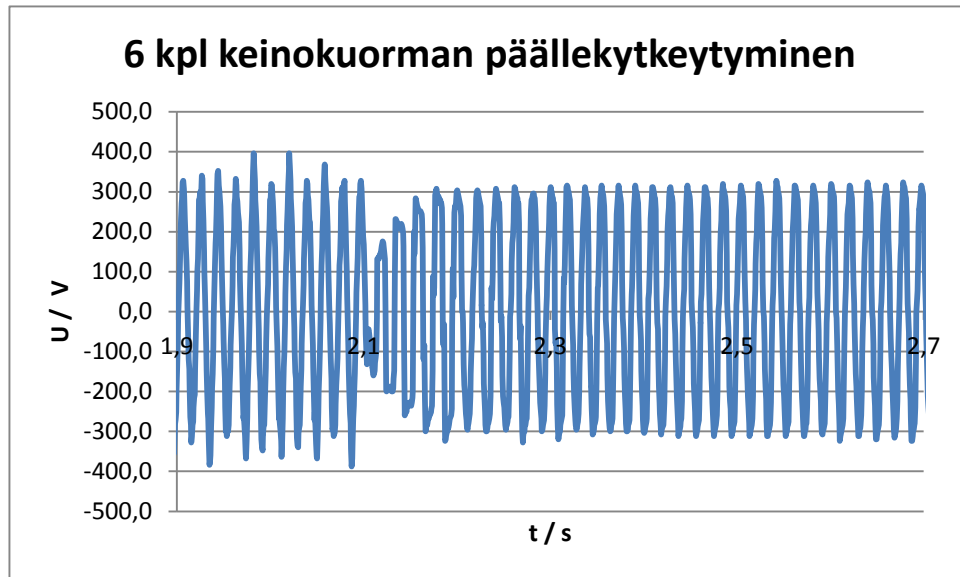
1 (4)



(jatkuu)



(jatkuu)



(jatkuu)

