

Konsekvenser av overharmoniske strømmer og spenninger fra elektronisk utstyr i lavspenningsanlegg

Daniel Mathisen

Master i energi og miljø

Innlevert: juni 2015

Hovedveileder: Eilif Hugo Hansen, ELKRAFT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for elkraftteknikk



MASTEROPPGAVE

- Kandidatens navn : Daniel Mathisen
- Fag : ELKRAFTTEKNIKK
- Oppgavens tittel (norsk) : **Konsekvenser av overharmoniske strømmer og spenninger fra elektronisk utstyr i lavspenningsanlegg**
- Oppgavens tittel (engelsk) : **Consequences of Harmonic Currents and Voltages from Electronic Equipment in Low Voltage Facilities**
- Oppgavens tekst : En stor andel elektroteknisk utstyr og komponenter er i dagens anlegg preget av elektronikk. Utstyr bestående av elektronikk har ulineære strømkarakteristikker og introduserer dermed utfordringer i form av overharmoniske strømmer og spenninger. For annet tilknyttet utstyr og komponenter i elektriske anlegg kan overharmoniske strømmer og spenninger medføre negative konsekvenser.

Kandidaten skal

- Undersøke kilder til harmoniske strømmer, konsekvenser og eventuelle tiltak.
- Utføre laboratoriemålinger og undersøke overharmoniske strømmer fra forbrukerutstyr det som regel er en høy tetthet av i yrkesbygg.
- Utføre målinger på yrkesbygg og undersøke typiske overharmoniske strømmer og spenninger i stigekabler og kurser.
- Vurdere måleresultater mot standarder som omhandler overharmoniske strømmer og spenninger.

Oppgaven gitt: 15.01.15
Besvarelsen leveres innen: 11.06.15
Kandidatens veileder: Eilif Hugo Hansen

Trondheim, 15.01.15

faglærer

Forord

Denne rapporten er et produkt av en masteroppgave ved Norges teknisk- naturvitenskapelige universitet, Institutt for elkraftteknikk, våren 2015. Oppgaven ble skrevet etter ønske fra Norsk Elektroteknisk Komite, representert av Leif T. Aanensen. Normalt er masteroppgaven en videreføring av fordypningsoppgaven utarbeidet i høstsemesteret, men i dette tilfellet ble det startet på et nytt tema på masteroppgaven.

Denne rapporten omhandler overharmoniske strømmer og spenninger generert av utstyr som inneholder elektronikk. Det er utført laboratoriemålinger på enkeltkomponenter, samt målinger på stige- og kurskabler i tre ulike yrkesbygg. Dette er et spennende og dagsaktuelt tema, så det har derfor vært svært interessant å arbeide med problemstillingen.

Jeg vil gjerne takke:

- Veileder Eilif Hugo Hansen for faglige innspill og oppbygging av oppgaven.
- Servicelaben ved Institutt for elkraftteknikk for hjelp med måleutstyr og bestilling av testobjekter.
- Arne Jorde, regionsjef COWI Oslo, for tips til temaer i oppgaven.
- Stig Hasselvold, driftsansvarlig Entra, for tilgang og hjelp med målinger i Brattørkaia 15.
- Sven-Terje Solum, overingeniør Elektro ved NTNU, for tilgang til P15-bygget.
- Medstudent Erik Pedersen for hjelp med målinger i P15-bygget.
- Sist, men ikke minst mine medstudenter for faglige diskusjoner og hyggelige kaffepauser.

Trondheim, juni 2015

Daniel Mathisen

Sammendrag

Dagens elektriske anlegg inneholder en stor andel forbrukerutstyr og komponenter som er basert på elektronikk. Elektronikken genererer overharmoniske strømmer og spenninger grunnet ulineære strømkarakterstikker, som blant annet kan medføre overlast og skade på elektrotekniske installasjoner. I mange tilfeller kan de harmoniske strømmene bli så store at det må tas hensyn til ved dimensjonering av elektriske installasjoner.

I denne oppgaven er kilder til overharmoniske strømmer, konsekvenser og tiltak undersøkt. Det ble utført laboratiemålinger på bærbare datamaskiner, PC-monitorer og diverse lyskilder som LED, sparelamper og lysrør. Videre ble det utført målinger på tre ulike yrkesbygg for å kartlegge overharmoniske strømmer og spenninger i stigekabler, og i enkeltkurser til lys og teknisk utstyr.

Laboratiemålingene viser at bærbare datamaskiner og PC-monitorer som får strømforsyning gjennom likerettere, genererer betydelige overharmoniske strømmer. Måleresultatene for LED-lamper viser svært varierende overharmoniske verdier mellom ulike produsenter. THDi-verdiene varierte mellom 9,2-139,2 %, mens andelen 3. harmoniske varierte mellom 4,8-81,9 % av den grunnharmoniske strømmen. Sparelamper genererte generelt høyere verdier av THDi og 3. harmoniske strømmer enn LED. Både LED og sparelamper hadde harmonisk emisjon tett opp mot grenseverdier i standarden EN61000-3-2. Videre viste målinger at T5-lysrør i lysrørarmatur med elektronisk forkobling, genererte lavere overharmoniske verdier enn LED-lysrør og fluorescerende T8-lysrør i lysrørarmatur med konvensjonell forkobling.

Det ble foretatt målinger på to undervisningsbygg og et kontorbygg. Flere av stigekablene som forsynte teknisk og lys hadde THDi-verdier mellom 10-50 %, som er ansett som en signifikant forvrengning av tilførselstrømmen. Total harmonisk forvrengning av spenningen (THDu), målt i underfordelinger, var derimot på et normalt nivå ($THDu < 5\%$). I alle stigekablene var 3. harmoniske strømmer den mest fremtredende harmoniske verdien.

Harmoniske strømmer i lyskurser er generelt lave, og det ble ikke avdekket nevneverdige forskjeller mellom lyskurser til LED-armaturer og lysrørarmatur med elektronisk forkobling. Harmoniske strømmer i stikkontaktkurser til datautstyr viser derimot svært høye verdier. De 3. harmoniske ble målt til 25-52 % av RMS-strømmen, og vil dermed være dimensjonerende ved prosjektering av liknende kurstyper.

Hovedkonklusjonen på bakgrunn av funnene i oppgaven, er at elektronisk

utstyr bør tas hensyn til ved dimensjonering av elektroinstallasjoner. Dette bør spesielt være i fokus i årene som kommer, da det er grunn til å tro at prosentandelen lineære laster i yrkesbygg reduseres i takt med utbyggingen av passiv- og plussbus. Ut fra måleresultatene er det anbefalt bruk av reduksjonsfaktoren 0,86 ved dimensjonering av 4-leder stige kabler til teknisk og lys i yrkesbygg. Det anbefales reduksjonsfaktor mellom 1-0,86 for 4-leder stikkontaktkurser, der ledertverrsnitt blir valgt på basis av N-lederstrømmen. Lyskurser synes ikke å ha bruk for reduksjonsfaktor.

Abstract

Today, electrical power systems contains a large proportion of electrical equipment and components which are based on electronics. Due to non-linear current characteristics, electronic equipment generate harmonic currents and voltages which may cause overload and damage to electrical systems. Often the harmonic currents become so large that it must be taken into account when designing electrical installations.

In this master thesis sources of harmonics, consequences and measures are studied. It has been conducted laboratory measurements on laptops, computer monitors and various light sources such as LED, energy saving lamps and fluorescent tubes. It has also been performed measurements in three different commercial buildings to investigate harmonic currents and voltages in riser cables and cables to lighting equipment and other technical equipment.

Laboratory measurements showed that laptops and computer monitors powered through rectifiers generate significant harmonic currents. The measurement results of LED lamps showed widely varying harmonic values between different manufacturers. THDi values ranged from 9,2 to 139,2 %, while 3rd harmonic ranged between 4,8 to 81,9 % of the fundamental harmonic current. Energy saving lamps generated generally higher levels of THDi and 3rd harmonic currents than LED. Both LED and energy saving lamps had harmonic emission close to the limits in EN61000-3-2. Further measurements on LED and fluorescent tubes showed that light fixtures with electronic ballast generated lower harmonics than LED tubes and fluorescent T8 tubes in light fixtures with electromagnetic ballast.

Measurements performed on two educational buildings and an office building showed that several riser cables that supplied technical and lighting equipment had THDi values between 10-50 %, which is considered a significant distortion of the supply current. Total harmonic distortion of supply voltage (THDu) was at the other hand at a normal level ($\text{THDu} < 5 \%$). In all riser cables 3rd harmonic currents were the most prominent harmonic.

Measurements carried out on light circuits showed generally low harmonics, and it was not revealed significant differences between light circuits to LED fixtures and fluorescent luminaries with electronic ballasts. However harmonic currents in socket circuits supplying computer equipment contained considerable harmonics. The 3rd harmonic was measured to 25-52 % of the RMS current, and will thus be dimensioning in electrical installation design.

The main conclusion on the basis of the findings in this thesis is that elect-

rical equipment consisting of electronics should be taken into account in the design of electrical installations. This should especially be the focus in the coming years since there is reason to believe that the percentage of linear loads in commercial buildings is reduced in line with the development of passive and energy-positive buildings. From the measurement results it is recommended use of the reduction factor 0,86 when sizing 4-wire riser cables supplying technical equipment and light in commercial buildings. Further it is recommended reduction factors between 1 to 0.86 for 4-wire socket circuits supplying computer equipment, where conductor cross-sections are chosen based on neutral current. Lighting circuits do not seem to have any use for the reduction factor.

Figurer

2.1	TN-C-S-nettets oppbygning [5].	4
2.2	Utvikling av total harmonisk forvrengning av spenningen i lavspenningsnettet i Norge [24].	5
2.3	Strøm og spenning til en lineær lastkilde.	6
2.4	Strøm og spenning til en ulineær lastkilde.	6
2.5	Harmoniske strømmer som flyter i en installasjon og distribusjonsnett [26].	7
2.6	Sinusformet kurveform med fundamentalfrekvens 50 Hz, samt 3. (150 Hz), 5. (250 Hz) og 7. harmoniske (350 Hz).	8
2.7	Forvrent periodisk kurveform bestående av strøm med fundamentalfrekvens 50 Hz, samt 3. (150 Hz), 5. (250 Hz) og 7. harmoniske (350 Hz).	9
2.8	Fasestrømmene i et ideelt 3-fasesystem.	10
2.9	Sammenfallende 3.harmoniske strømmer.	11
2.10	De 5.harmoniske strømmene har motsatt fasefølge i forhold til de grunnharmoniske fasestrømmene.	12
2.11	Typisk kurveform til strømmen tilført enfaset diodelikeretter med kondensator [2].	14
2.12	Typisk overharmonisk spektrum til strømmen tilført enfaset diodelikeretter med kondensator (THDi=130%) [2].	14
2.13	Utvikling lyskildeeffektivitet LED og andre konvensjonelle lyskilder [10].	15
2.14	Blokkdiagram av elektronisk forkobling i LED-lamper [27]. . .	16
2.15	En sparelampes oppbygning [28].	18
2.16	Aktivt og passivt filter i parallell med ulineære last [26]. . . .	22
3.1	Effektanalysator Fluke 43 [31] og strømtang Fluke 80i-110s [4].	34
3.2	Oppkobling av måleutstyr [8].	35
3.3	Måleoppsett feltmålinger.	42
3.4	Energianalysator Fluke 434 [31].	43
3.5	Elektrobygget NTNU [21].	44

3.6	Kontorlandskap Brattørkaia 15 [32].	45
3.7	Romoversikt P15-bygget [20].	46
4.1	Strøm- og spenningskurve PC 1.	48
4.2	Strøm- og spenningskurve PC 3.	48
4.3	Overharmonisk spektrum [%rms] 1-4 stk. PC 2.	50
4.4	Strøm-, spenningskurve og overharmonisk spektrum PC mon 1.	51
4.5	Strøm- og spenningskurve HALO E7 1.	52
4.6	Strøm- og spenningskurve LED E27 5.	53
4.7	Overharmonisk spektrum for LED GU10 spotter med lavest og høyest THDi.	54
4.8	Strøm-, spenningskurve og overharmonisk spektrum CFL E27 1.	55
4.9	Strøm-, spenningskurve og overharmonisk spektrum LED ST8 1.	56
4.10	Målinger stige-kabel 3. etg. E-blokk.	58
4.11	Målinger stige-kabel 3. etg. F-blokk.	59
4.12	Overharmonisk spektrum spenning, stige-kabel underfordeling 3. etg. E- og F-blokk.	60
4.13	Strøm-, spenningskurve og overharmonisk spektrum kurs F82.	61
4.14	Måleresultater stige-kabel XQ107, Brattørkaia 15.	63
4.15	Måleresultater stige-kabel XQ106, Brattørkaia 15.	63
4.16	Strøm-, spenningskurve og overharmonisk spektrum lyskurs XF210.	64
4.17	Strøm-, spenningskurve og overharmonisk spektrum stikkontaktkurs XF113.	65
4.18	Strøm- og spenningskurver stige-kabel P15-bygget.	66
4.19	Harmoniske i stige-kabel, P15-bygget.	67
4.20	Strøm-, spenningskurve og overharmonisk spektrum kurs XQ309.	68
5.1	Endring i overharmoniske verdier med økende antall datamaskiner.	72
5.2	Oversikt over måleresultater fra ulike LED-lamper med E27- og E14-sokkel.	73
5.3	Sammenligning av LED med grenseverdier i IEC61000-3-2.	75
5.4	Sammenligning lyskilder med E24- og E14-sokkel.	76
5.5	Sammenligning målinger 2010 og 2015 av THDi og 3. h i stige-kabel 3. etg E-blokk.	80
B.1	Måleresultater test-ID: HALO E27 1	100
B.2	Måleresultater test-ID: LED E27 1	101

B.3	Måleresultater test-ID: LED E27 2	102
B.4	Måleresultater test-ID: LED E27 3	103
B.5	Måleresultater test-ID: LED E27 4	104
B.6	Måleresultater test-ID: LED E27 5	105
B.7	Måleresultater test-ID: LED E14 1	106
B.8	Måleresultater test-ID: LED E14 2	107
B.9	Måleresultater test-ID: LED GU10 1	108
B.10	Måleresultater test-ID: LED GU10 2	109
B.11	Måleresultater test-ID: LED GU10 3	110
B.12	Måleresultater test-ID: LED GU10 4	111
B.13	Måleresultater test-ID: LED GU10 5	112
B.14	Måleresultater test-ID: LED ST8 1	113
B.15	Måleresultater test-ID: LED ST8 2	114
B.16	Måleresultater test-ID: LED ST8 3	115
B.17	Måleresultater test-ID: LED ST8 4	116
B.18	Måleresultater test-ID: FL T8 1	117
B.19	Måleresultater test-ID: FL T5 1	118
B.20	Måleresultater test-ID: CFL E27 1	119
B.21	Måleresultater test-ID: CFL E27 2	120
B.22	Måleresultater test-ID: CFL E14 1	121
B.23	Måleresultater test-ID: CFL E14 2	122
C.1	Måleresultater test-ID: PC 1	124
C.2	Måleresultater test-ID: PC 2	125
C.3	Måleresultater test-ID: PC 3	126
C.4	Måleresultater test-ID: PC 4	127
C.5	Måleresultater test-ID: PC 5	128
C.6	Måleresultater test-ID: 4 stk. PC 2	129
C.7	Måleresultater test-ID: 3 stk. PC 2	130
C.8	Måleresultater test-ID: 2 stk. PC 2	131
D.1	Måleresultater test-ID: PC mon 1	133
D.2	Måleresultater test-ID: PC mon 2	134
D.3	Måleresultater test-ID: PC mon 3	135
D.4	Måleresultater test-ID: PC mon 4	136
E.1	Måleresultater stigekabel underfordeling 3. etg. E-blokk.	138
E.2	Måleresultater stigekabel underfordeling 3. etg. F-blokk.	139
E.3	Måleresultater kurs F81.	140
E.4	Måleresultater kurs F83.	141
E.5	Måleresultater kurs F80.	142

E.6	Måleresultater kurs F82.	143
E.7	Måleresultater kurs F41.	144
E.8	Måleresultater kurs F43.	145
E.9	Måleresultater kurs F72.	146
F.1	Måleresultater stige-kabel XQ101, Brattørkaia 15.	148
F.2	Måleresultater stige-kabel XQ102, Brattørkaia 15.	149
F.3	Måleresultater stige-kabel XQ104, Brattørkaia 15.	150
F.4	Måleresultater stige-kabel XQ105, Brattørkaia 15.	151
F.5	Måleresultater stige-kabel XQ106, Brattørkaia 15.	152
F.6	Måleresultater stige-kabel XQ107, Brattørkaia 15.	153
F.7	Måleresultater stige-kabel XQ108, Brattørkaia 15.	154
F.8	Måleresultater stige-kabel XQ109, Brattørkaia 15.	155
F.9	Måleresultater kurskabel XF201, Brattørkaia 15.	156
F.10	Måleresultater kurskabel XF210, Brattørkaia 15.	157
F.11	Måleresultater kurskabel XF211, Brattørkaia 15.	158
F.12	Måleresultater kurskabel XF113, Brattørkaia 15.	159
G.1	Måleresultater stige-kabel XQ101, Brattørkaia 15.	161
G.2	Måleresultater kurskabel XQ306, P15-bygget.	162
G.3	Måleresultater kurskabel XQ307, P15-bygget.	163
G.4	Måleresultater kurskabel XQ309, P15-bygget.	164
G.5	Måleresultater kurskabel XQ020, P15-bygget.	165
H.1	Måleresultater stige-kabel underfordeling 3. etg. E-blokk mas- teropp-gave år 2010 [33].	167
H.2	Måleresultater fra målinger i Elektrobygget på kursnivå [33].	168

Tabeller

2.1	Harmoniske sekvenskomponenter [9].	19
2.2	Grenseverdier for utstyr klasse C med aktiv effekt ≥ 25 W [19].	26
2.3	Grenseverdier for utstyr klasse C med aktiv effekt ≤ 25 W [19].	27
2.4	Grenseverdier for utstyr klasse D [19].	27
2.5	Harmonisk nivå og sannsynlige uheldige virkninger, NEK400:2014 [18]	28
2.6	Reduksjonsfaktor for harmoniske strømmer i 4 og 5-lederkabler [18].	30
2.7	Grenseverdier til individuelle harmoniske forvrengninger for hvert multiplum av den grunnharmoniske frekvensen i spenningsområdet 230 V til 35 kV [15].	31
3.1	Oversikt testobjekter bærbare datamaskiner.	36
3.2	Oversikt testobjekter PC-monitorer.	37
3.3	Oversikt over referanselyskilde.	38
3.4	Oversikt testobjekter LED E14.	38
3.5	Oversikt testobjekter LED E27.	39
3.6	Oversikt testobjekter LED GU10.	40
3.7	Oversikt testobjekter sparelamper E27 og E14.	41
3.8	Oversikt testobjekter lysrør (LED ST8, fluorescerende T5- og T8 lysrør.)	41
4.1	Måleresultater overharmoniske strømmer fra ulike bærbare datamaskiner.	48
4.2	Måleresultater overharmoniske strømmer 1-4 stk. PC 2.	49
4.3	Måleresultater overharmoniske strømmer fra ulike PC-monitorer.	51
4.4	Måleresultat referanselyskilde.	52
4.5	Måleresultater overharmoniske strømmer fra LED-lamper med E27- og E14-sokkel.	53
4.6	Måleresultater overharmoniske strømmer fra LED GU10 spot.	54

4.7	Måleresultater overharmoniske strømmer fra sparelamper med E27- og E14-sokkel.	55
4.8	Måleresultater overharmoniske strømmer fra LED- og fluorescerende lysrør.	56
4.9	Måleresultater strømverdier i stigekabler, Elektrobygget.	57
4.10	Måleresultater overharmoniske spenninger i underfordelinger, Elektrobygget.	60
4.11	Måleresultater strømverdier i kurskabler E-blokk.	61
4.12	Måleresultater strømverdier i stigekabler til underfordelinger som forsyner teknisk og lys, Brattørkaia 15.	62
4.13	Måleresultater strømverdier i kurskabler, Brattørkaia 15.	64
4.14	Måleresultater strømverdier i stigekabel, P15-bygget.	66
4.15	Måleresultater overharmoniske spenninger i stigekabelen, P15-bygget.	67
4.16	Måleresultater strømverdier kurskabler, P15-bygget.	68
5.1	Anbefalte red.faktorer for 4- og 5-lederkabler med hensyn på 3. harmoniske strømmer.	89
E.1	Tabelloversikt overharmoniske strømmer kurs F81.	140
E.2	Tabelloversikt overharmoniske strømmer kurs F83.	141
E.3	Tabelloversikt overharmoniske strømmer kurs F80.	142
E.4	Tabelloversikt overharmoniske strømmer kurs F82.	143
E.5	Tabelloversikt overharmoniske strømmer kurs F41.	144
E.6	Tabelloversikt overharmoniske strømmer kurs F43.	145
E.7	Tabelloversikt overharmoniske strømmer kurs F72.	146
F.1	Tabelloversikt overharmoniske strømmer kurs XF201.	156
F.2	Tabelloversikt overharmoniske strømmer kurs XF210.	157
F.3	Tabelloversikt overharmoniske strømmer kurs XF211.	158
F.4	Tabelloversikt overharmoniske strømmer kurs XF113.	159
G.1	Tabelloversikt overharmoniske strømmer kurs XQ306.	162
G.2	Tabelloversikt overharmoniske strømmer kurs XQ307.	163
G.3	Tabelloversikt overharmoniske strømmer kurs XQ309.	164
G.4	Tabelloversikt overharmoniske strømmer kurs XQ020.	165

Innhold

1	Innledning	1
2	Teori	3
2.1	TN-nett	3
2.2	EMC - emisjon og immunitet	4
2.3	Overharmoniske strømmer og spenninger	5
2.3.1	Lineær og ulineær belastning	5
2.3.2	Beskrivelse av fenomenet overharmoniske	8
2.3.3	Dekomponering av forvrengte kurveformer	8
2.3.4	Overharmoniske strømmer i 3-fasesystem	10
2.3.5	Total Harmonisk Forvrengning (THD)	12
2.4	Kilder til overharmoniske strømmer	13
2.4.1	Enfaset diodelikeretter med kondensator	14
2.4.2	LED	15
2.4.3	Fluorescerende lysrør	17
2.4.4	Sparelamper (kompaktlamper)	18
2.5	Konsekvenser av overharmoniske strømmer	19
2.6	Tiltak mot overharmoniske strømmer	21
2.6.1	Filter	22
2.6.2	Reaktorer	23
2.6.3	Modifikasjoner i installasjonen	23
2.6.4	Overdimensjonering	24
2.7	NEK EN61000-3-2:2014	25
2.7.1	Generelt	25
2.7.2	Overharmoniske grenseverdier	25
2.8	NEK400:2014 Tillegg 53K (informativt)	28
2.9	Dimensjoneringskriterier etter NEK400:2014	29
2.10	Forskrift om leveringskvalitet	31
3	Metode	33

3.1	Laboratorieforsøk	34
3.1.1	Måleutstyr og måleteknikk	34
3.1.2	Testobjekter	36
3.2	Målinger på anlegg	42
3.2.1	Måleutstyr og måleteknikk	42
3.2.2	Utvalgte bygg	44
4	Resultater	47
4.1	Resultater av laboratoriemålinger	47
4.1.1	Bærbare datamaskiner	47
4.1.2	PC-monitorer	51
4.1.3	Lyskilder	52
4.2	Resultater av målinger på anlegg	57
4.2.1	Elektrobygget, NTNU Gløshaugen	57
4.2.2	Brattørkaia 15, Trondheim	62
4.2.3	P15-bygget, NTNU Gløshaugen	66
5	Diskusjon	69
5.1	Diskusjon av metode	69
5.2	Laboratorieforsøk	70
5.2.1	Bærbare datamaskiner	70
5.2.2	PC-monitorer	72
5.2.3	Lyskilder	73
5.3	Målinger på anlegg	78
5.3.1	Elektrobygget, NTNU Gløshaugen	78
5.3.2	Brattørkaia 15, Trondheim	82
5.3.3	P15-bygget, NTNU Gløshaugen	85
5.3.4	Generell betraktning av målinger på anlegg	86
5.3.5	Anbefalte reduksjonsfaktorer i kontor- og undervisnings- bygg	89
5.4	Videre arbeid	90
6	Konklusjon	91
	Vedlegg	97
	A Oversikt over måleinstrumenter	98
	B Måleresultater belysningskilder	99
	C Måleresultater bærbare datamaskiner	123

D	Måleresultater PC-monitorer	132
E	Måleresultater Elektrobygget, NTNU Gløshaugen	137
F	Måleresultater Brattørkaia 15, Trondheim	147
G	Måleresultater P15-bygget, NTNU Gløshaugen	160
H	Måleresultater tidligere masteroppgave	166

Kapittel 1

Innledning

Både nasjonalt og internasjonalt er det fokus på elektrisk støy i form av overharmoniske strømmer og spenninger i elkraftnettet. En stor andel elektroteknisk utstyr og komponenter inneholder i dagens anlegg elektronikk. Utstyr med elektronikk har ulineære strømkarakteristikker, og introduserer dermed utfordringer i form av overharmoniske strømmer og spenninger. Potensielle støykilder kan for eksempel være likerettere i datautstyr, belysningsutstyr (LED, lysrørarmaturer, sparelamper, etc.), UPS-installasjoner og kraftelektroniske komponenter for motorstyring. For annet tilknyttet utstyr og komponenter i elektriske anlegg, kan overharmoniske strømmer og spenninger medføre negative konsekvenser.

I tillegg til en økende bruk av elektronisk utstyr, reduseres andelen lineære laster, som f.eks. elektriske varmeovner og glødelamper. Nye bygg planlegges og bygges etter TEK10, og i mange tilfeller som passivhus eller pluss hus. På bakgrunn av dette er det dermed grunn til å tro at prosentandelen lineære laster i nybygg har minnet de seneste årene. Dette kan medføre betydelige overharmoniske strømmer og spenninger i elektriske anlegg. I tillegg til skade på annet tilkoblet forbrukerutstyr, kan harmoniske strømmer føre til overlast og skade på elektrotekniske installasjoner. I TN-anlegg medfører ulineære strømkarakteristikker i faseledere at strømmen i N-leder kan bli betydelig. I mange tilfeller kan disse strømmene bli så store at det må tas hensyn til ved dimensjonering av elektrotekniske installasjoner.

På bakgrunn av dette er målet med denne oppgaven følgende:

1. Undersøke kilder til harmoniske strømmer, konsekvenser og eventuelle tiltak.

2. Utførelse av laboratoriemålinger og kartlegging av overharmoniske strømmer generert av potensielle støykilder.
3. Utførelse av målinger og kartlegging av overharmoniske strømmer og spenninger i stige kabler, samt enkeltkurser til lys og teknisk utstyr i kontor- og undervisningsbygg.
4. Vurdere måleresultatene mot standarder som omhandler overharmoniske strømmer og spenninger.

Denne oppgaven er avgrenset til å omhandle ulineære lastkilder som det som regel er en høy tetthet av i for eksempel kontor- og undervisningsbygg. Det ble dermed utført laboratoriemålinger på bærbare datamaskiner med tilhørende strømforsyning, PC-monitører og diverse lyskilder som LED, sparelamper og lysrør. Større ulineære 3-faselaster er utelatt fra denne oppgaven.

Resten av oppgaven er strukturert på følgende måte: kapittel 2 omhandler nødvendig teori. Kapitlet presenterer blant annet teori om hva overharmoniske strømmer og spenninger er, kilder til dette, konsekvenser og tiltak. Av kapitlet fremkommer også aktuelle normer og forskrifter som omhandler overharmoniske strømmer og spenninger. Kapittel 3 omfatter beskrivelse av fremgangsmåte, benyttet måleutstyr, måleoppsett, samt presentasjon av testobjekter og utvalgte bygg. I kapittel 4 blir måleresultatene av både laboratoriemålingene og målingene på anlegg presentert. Kapittel 5 omfatter en diskusjon av metode, måleresultater og forslag til videre arbeid. Kapittel 6 gir en konklusjon av de viktigste funnene i oppgaven.

Kapittel 2

Teori

2.1 TN-nett

Det skilles hovedsakelig mellom tre ulike lavspente nettsystemer med hensyn til anleggets jordingsforhold [12]:

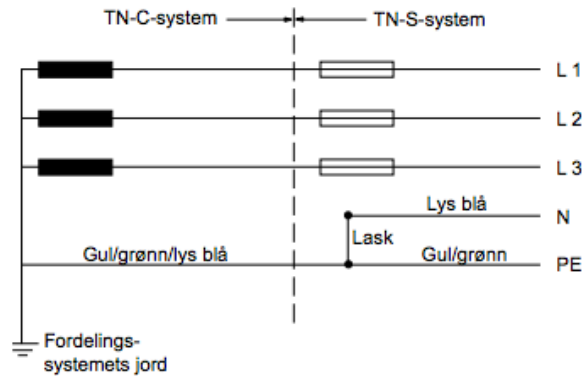
1. IT-nett
2. TN-nett (TN-C-nett, TN-S-nett og TN-C-S-nett)
3. TT-nett

Da de fleste større nybygg utformes med TN-nett, og denne oppgaven hovedsakelig omhandler overharmoniske strømmer i TN-anlegg, vil ikke IT-nett og TT-nett bli nærmere beskrevet. TN-nett kan videre deles inn i tre ulike utførelser [12]:

1. TN-C-nett: N-lederen og PE-lederen er kombinert i én leder, PEN-lederen.
2. TN-S-nett: N-lederen og PE-lederen er atskilt som to ledere.
3. TN-C-S-nett: N-lederen og PE-lederen er kombinert i én leder i kun en del av anlegget.

Figur 2.1 viser oppbygningen til et TN-C-S-nett, som er en kombinasjon av TN-C-nett og TN-S-nett. Som figuren viser, blir vanligvis TN-C-S-systemet brukt som TN-C-system frem til den første fordelingen i en bygning, for deretter å fortsette som TN-S-system videre i anlegget. I 230/400 V TN-system er linjespenningen 400 V, og fasespenningen 230 V. Enfase 230 V

laster tilkobles mellom én av faselederne og nøytrallederen, mens trefase 400 V laster tilkobles mellom de tre faselederne [12].



Figur 2.1: TN-C-S-nettets oppbygning [5].

2.2 EMC - emisjon og immunitet

EMC (eng: electromagnetic compatibility) står for elektromagnetisk sameksistens/elektromagnetisk forenelighet. EMC kan defineres som [13]:

”Den evne en innretning, et apparat eller et system har til funksjonere tilfredsstillende i sitt elektromagnetiske miljø uten å frembringe uakseptable elektromagnetiske forstyrrelser for noe i dette miljø.”

EMC omfatter de to begrepene emisjon og immunitet. Emisjon betegner generering av støyenergi fra en kilde, mens immunitet betegner en innretning, apparat eller system sin evne til å fungere uten redusert yteevne i nærvær av støyenergi. Generering av støy kan være ledningsbundet, strålt eller en kombinasjon av disse [13]. EMC-problemene kan reduseres ved å [25]:

- Minske støyemisjonen fra kilden
- Øke immuniteten til mottaker av støy
- Redusere graden av kobling gjennom koblingsveien mellom støykilde og mottaker av støy.

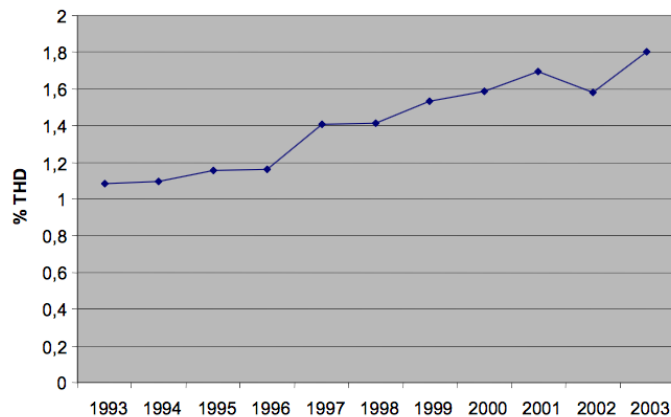
Kort oppsummert er en innretning, apparat eller system elektromagnetisk kompatibelt dersom [13]:

1. Det ikke forstyrrer andre apparater eller systemer

2. Det ikke er mottakelig for forstyrrelser andre apparater eller systemer
3. Det ikke forstyrrer seg selv.

2.3 Overharmoniske strømmer og spenninger

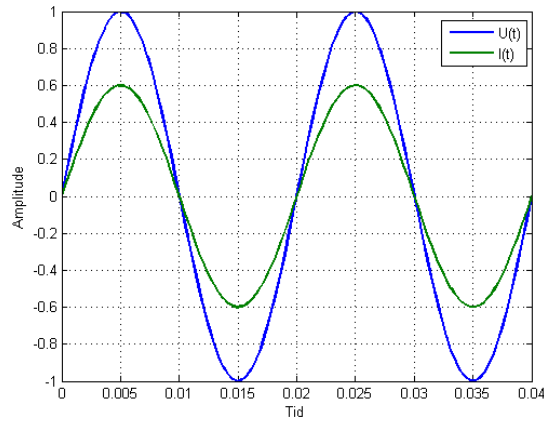
Overharmoniske strømmer har til alle tider vært tilstede i det elektriske kraftsystemet. I Norge har det imidlertid tradisjonelt sett vært en liten grad av overharmoniske strømmer og spenninger, da kraftsystemet tidligere har bestått av en stor andel lineære laster, eksempelvis elektriske panelovner og glødelamper. En økt andel ulineære lastkilder har imidlertid medført høyere verdier av overharmoniske strømmer og spenninger i det elektriske kraftsystemet [24]. Figur 2.2 viser en utvikling fra 1993 til 2003 i målt total harmonisk forvrengning av spenningen i lavspenningsnettene i Norge.



Figur 2.2: Utvikling av total harmonisk forvrengning av spenningen i lavspenningsnettene i Norge [24].

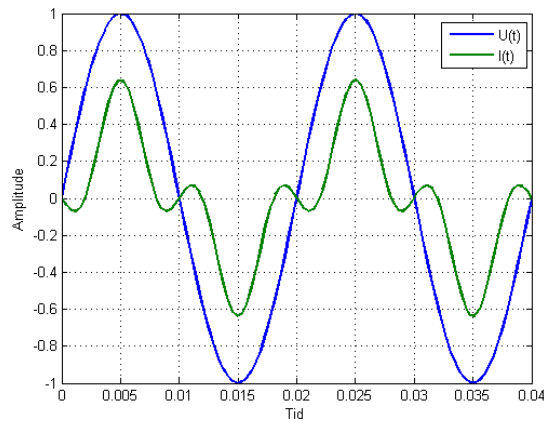
2.3.1 Lineær og ulineær belastning

I et elektrisk kraftsystem er lastkilder som trekker en strøm som er proporsjonal til forsyningsspenningen ansett som en lineær last [26]. Lineære laster har en strøm- og spenningskurve som vist i figur 2.3.



Figur 2.3: Strøm og spenning til en lineær lastkilde.

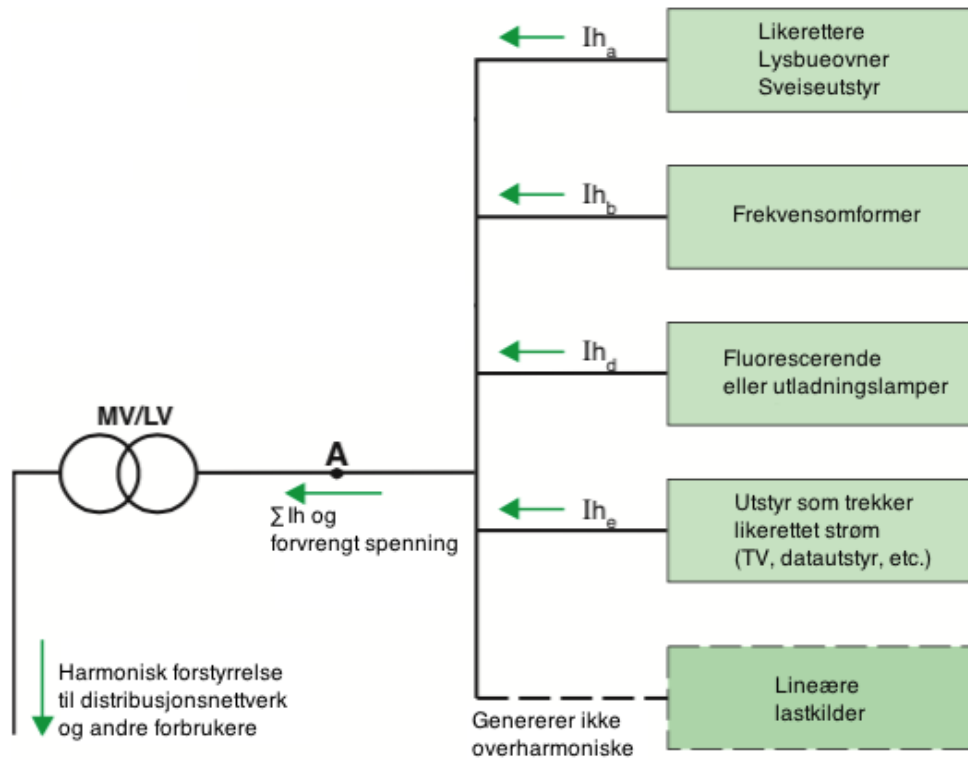
Ulineære lastkilder trekker en laststrøm med ulik kurveform enn forsynings-spenningen, altså ikke-sinusformet strøm. Konsekvensen av ulineære lastkilder er overharmoniske strømmer som flyter i kraftnettet. Overharmoniske strømmer og spenninger i et elektrisk anlegg indikerer at strømmens og spenningens kurveform er forvrengt fra den ideelle kurveformen til en sinuskurve [26]. Figur 2.4 viser en ulineær belastning med ulineær strøm karakteristikk.



Figur 2.4: Strøm og spenning til en ulineær lastkilde.

Figur 2.5 viser et installasjon som forsyner ulineære lastkilder. De ulineære lastene injiserer en harmonisk strøm, I_h , videre opp i installasjonen mot kilden. Reaktansen til en leder er en funksjon av frekvensen til strømmen og øker dermed med den harmoniske strømmen som flyter gjennom lederen. Dermed er det en impedans Z_h for hver harmoniske strøm I_h . Når den harmoniske

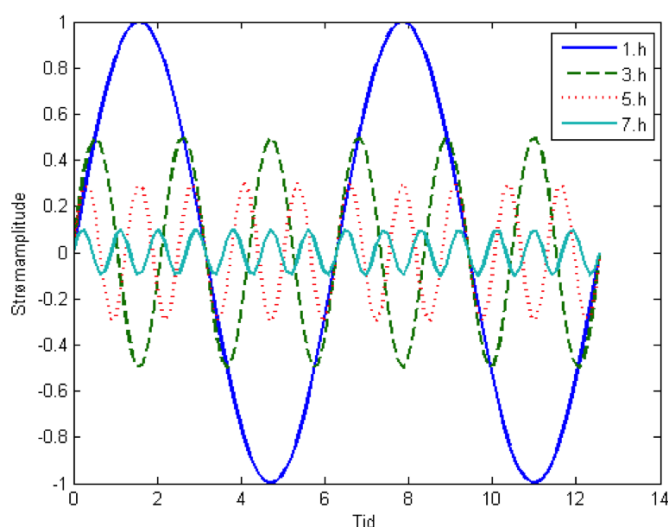
strømmen flyter gjennom impedansen Z_h , genereres en harmonisk spenning U_h [26].



Figur 2.5: Harmoniske strømmer som flyter i en installasjon og distribusjonsnett [26].

2.3.2 Beskrivelse av fenomenet overharmoniske

Overharmoniske er definert som en komponent med en frekvens lik et heltalls multiplum (harmonisk orden h) av den grunnharmoniske frekvensen [2]. I det norske elektriske kraftsystemet er den grunnharmoniske frekvensen til strøm og spenning 50 Hz. Figur 2.6 viser den grunnharmoniske frekvensen sammen med 3. (150 Hz), 5. (250 Hz) og 7. harmoniske (350 Hz). I dette eksempelet er amplituden til den grunnharmoniske 1, mens amplituden til de 3., 5. og 7. harmoniske er henholdsvis 0,5, 0,3 og 0,2.



Figur 2.6: Sinusformet kurveform med fundamentalfrekvens 50 Hz, samt 3. (150 Hz), 5. (250 Hz) og 7. harmoniske (350 Hz).

2.3.3 Dekomponering av forvrengte kurveformer

Enhver forvrengt periodisk kurveform kan dekomponeres til en Fourier-rekke bestående av et konstantledd, en sinuskurve med grunnharmonisk frekvens og et antall sinuskurver med frekvens av harmonisk orden [11]. Uttrykk (2.1) viser strømmen, $i(t)$, representert som en Fourier-rekke [11].

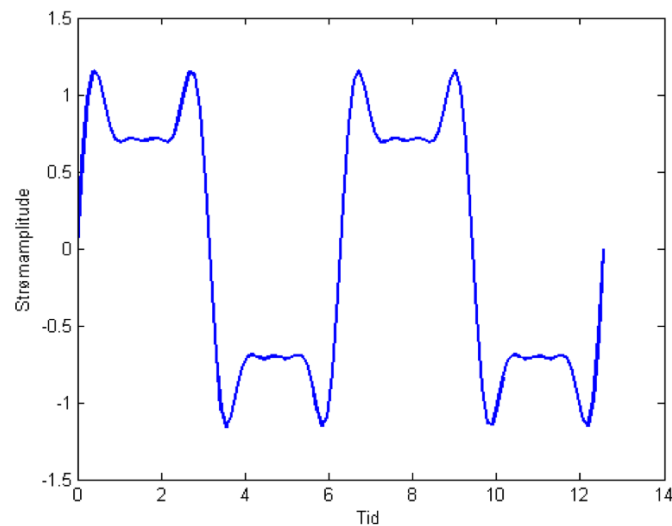
$$i(t) = I_{dc} + \sum_{h=1}^{\infty} I_h \sin(h\omega_1 t + \theta_h) \quad (2.1)$$

Der I_{dc} er likestrømsleddet, I_h toppamplituden til hver orden h , ω_1 er den grunnharmoniske frekvensen (gitt i radianer pr sekund), og θ_h er overharmo-

nisk fasevinkel. Eksempelvis kan strømmene i figur 2.6 samles i det matematiske uttrykket (2.2).

$$i(t) = 1.0 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t) + 0.5 \cdot \sin(3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t) + 0.3 \cdot \sin(5 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t) + 0.1 \cdot \sin(7 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t) \quad (2.2)$$

Figur 2.7 viser den forvrengte periodiske kurveformen til det matematiske uttrykket (2.2).



Figur 2.7: Forvrengt periodisk kurveform bestående av strøm med fundamental-frekvens 50 Hz, samt 3. (150 Hz), 5. (250 Hz) og 7. harmoniske (350 Hz).

I eksempelet ovenfor er det ikke lagt inn noen form for forskyvning i fasevinkelen, θ . I tilfeller med forskyvning i fasevinkelen til de overharmoniske vil strømkurven se annerledes ut.

2.3.4 Overharmoniske strømmer i 3-fasesystem

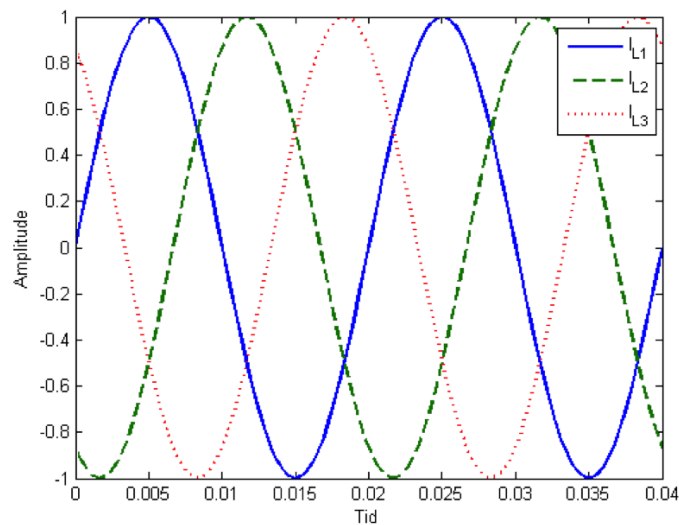
I et ideelt 3-fasesystem vil fasestrømmene være sinusformet med 120 grader faseforskyvning i forhold til hverandre, uttrykt matematisk i uttrykkene (2.3)-(2.5) [12]:

$$i_{L1}(t) = I \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2.3)$$

$$i_{L2}(t) = I \cdot \sin(\omega \cdot t - 120^\circ) \quad (2.4)$$

$$i_{L3}(t) = I \cdot \sin(\omega \cdot t - 240^\circ) \quad (2.5)$$

En grafisk fremstilling av fasestrømmene i et ideelt 3-fasesystem er vist i figuren 2.8. Med balanserte og lineære trefasestrømmer som er faseforskjøvet 120° fra hverandre, vil summen av strømmene i N-lederen alltid være lik null.



Figur 2.8: Fasestrømmene i et ideelt 3-fasesystem.

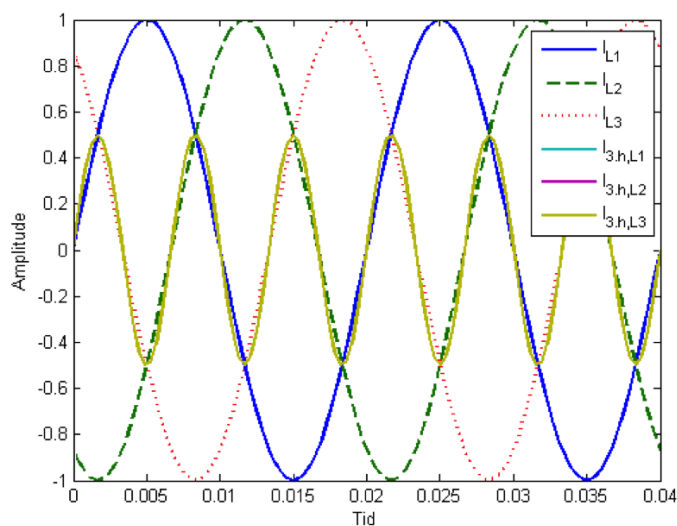
Dersom de tre fasestrømmene får trippelharmoniske komponenter, vil strømmene i de tre faselederne sammenfalle. Dette kan vises matematisk med uttrykkene (2.6)-(2.8) [12].

$$i_{3,h,L1}(t) = I \cdot \sin(3 \cdot \omega \cdot t) \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned}
i_{3,h,L2}(t) &= I \cdot \sin(3 \cdot (\omega \cdot t - 120^\circ)) = \\
I \cdot \sin(3 \cdot \omega \cdot t - 360^\circ) &= I \cdot \sin(3 \cdot \omega \cdot t)
\end{aligned}
\tag{2.7}$$

$$\begin{aligned}
i_{3,h,L3}(t) &= I \cdot \sin(3 \cdot (\omega \cdot t - 240^\circ)) = \\
I \cdot \sin(3 \cdot \omega \cdot t - 720^\circ) &= I \cdot \sin(3 \cdot \omega \cdot t)
\end{aligned}
\tag{2.8}$$

En grafisk fremstilling av dette vises i figur 2.9.



Figur 2.9: Sammenfallende 3.harmoniske strømmer.

I TN-system er N-lederen fremtrukket, og de trippelharmoniske strømmene vil summeres i N-lederen. Dette kan medføre store strømmer i N-lederen og varmeutviklingen i ledere vil øke. Dette må tas hensyn til ved dimensjonering av elektriske anlegg [12].

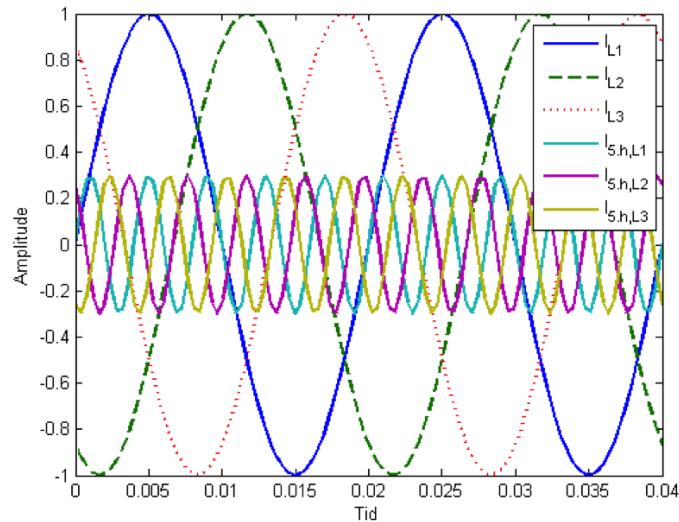
Dersom frekvensen til fasestrømmene 5-dobles (5. harmoniske) kan det vises grafisk og matematisk at strømmene igjen er 120 grader faseforskjøvet i forhold til hverandre, men nå med motsatt fasefølge enn den grunnharmoniske. De matematiske uttrykkene (2.9)-(2.11) viser dette.

$$i_{5,h,L1}(t) = I \cdot \sin(5 \cdot \omega \cdot t)
\tag{2.9}$$

$$\begin{aligned}
 i_{5,h,L2}(t) &= I \cdot \sin(5 \cdot (\omega \cdot t - 120^\circ)) = \\
 I \cdot \sin(5 \cdot \omega \cdot t - 600^\circ) &= I \cdot \sin(5 \cdot \omega \cdot t - 240^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

$$\begin{aligned}
 i_{5,h,L3}(t) &= I \cdot \sin(5 \cdot (\omega \cdot t - 240^\circ)) = \\
 I \cdot \sin(5 \cdot \omega \cdot t - 1200^\circ) &= I \cdot \sin(5 \cdot \omega \cdot t - 120^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

En grafisk fremstilling av 5. harmoniske strømmer i de tre fasene er vist i figur 2.10.



Figur 2.10: De 5.harmoniske strømmene har motsatt fasefølge i forhold til de grunnharmoniske fasestrømmene.

2.3.5 Total Harmonisk Forvrengning (THD)

THD (Total Harmonic Distortion), total harmonisk forvrengning, er en vanlig måte å representere graden av harmonisk forvrengning av strøm og spenning. THD kan enten representeres med hensyn på RMS-verdien til strøm og spenning eller med hensyn på den grunnharmoniske komponenten. THD [%f] er et mål på total harmonisk forvrengning i forhold til den grunnharmoniske komponenten, mens THD [%r] viser total harmonisk forvrengning i forhold

til effektivverdien (RMS) av strøm eller spenning. Uttrykkene (2.12) og (2.13) viser THD for henholdsvis strøm og spenning [26].

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (2.12)$$

og

$$THDu = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} \quad (2.13)$$

Avhengig av lastene kan THDi typisk varierer fra noen få prosent til mer enn 100%, mens THDu som regel er mindre enn 5%. THDu under 5% blir ansett som akseptabelt, mens THDu på over 10% blir ansett som uakseptabelt da det kan skape problemer for sensitive laster [11].

2.4 Kilder til overharmoniske strømmer

Som nevnt i delkapittel 2.3 skyldes harmoniske strømmer ulineære laster i installasjoner, der laster som inneholder elektronikk er hovedkilden til overharmoniske strømmer. Eksempler på laster som genererer overharmoniske strømmer kan være [26] [2]:

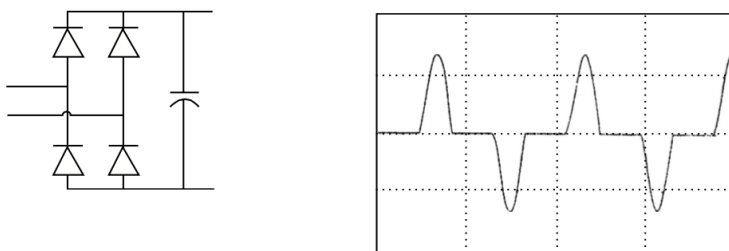
- Elektroteknisk utstyr som trekker likerettet strøm, eksempelvis data-maskiner, TV-er, kopimaskiner, etc.
- Lyskilder og belysningsutstyr, som f.eks. lysrørarmaturer med elektronisk- eller konvensjonell forkobling, LED, sparelamper, etc.
- Utstyr med magnetisk kjerne, som transformatorer, elektriske motorer, generatorer, osv.
- Industrielle laster som sveiseapparater, lysbueovner og induksjonsovner
- UPS-systemer

I de etterfølgende delkapitlene er oppbygning og virkemåte til et utvalg ulineære lastkilder presentert nærmere.

2.4.1 Enfaset diodelikeretter med kondensator

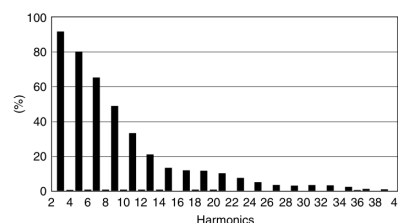
Det meste av moderne elektronisk utstyr får strømtilførsel gjennom enfasede diodelikerettere med en kondensator (eng: Switched Mode Power Supplies), som er en energieffektiv måte å omforme vekselstrøm til likestrøm. Denne konfigurasjonen blir blant annet brukt som strømtilførsel til datamaskiner, PC-monitorer, fjernsyn, printere og i batteriladere.

Figur 2.11 viser diodelikeretteren og kondensatoren som er to av hovedkomponentene i denne konfigurasjonen. Kondensatoren har som oppgave å ”glatte ut” DC-strømmen og -spenningen før den tilføres komponenten. Dette medfører at AC-tilførselen lader opp kondensatoren i kun en del av halv-syklusen [11]. Ulempen med denne konfigurasjonen er at strømmen trekkes som pulser med høy amplitude. Disse pulsstrømmene inneholder stor andel harmoniske verdier som kan føre til forvrengning av spennings kurveform [2].



Figur 2.11: Typisk kurveform til strømmen tilført enfaset diodelikeretter med kondensator [2].

Denne formen for strømtilførsel står for generering av odde harmoniske strømmer, som videre kan forvrengre forsyningsspenningen til andre andre laster. Figur 2.12 viser typisk harmonisk spektrum til strømmen tilført enfaset diodelikeretter med kondensator. Det overharmoniske spekteret viser at 3., 5. og 7. harmoniske kan få betydelig amplitude i forhold til den grunnharmoniske.

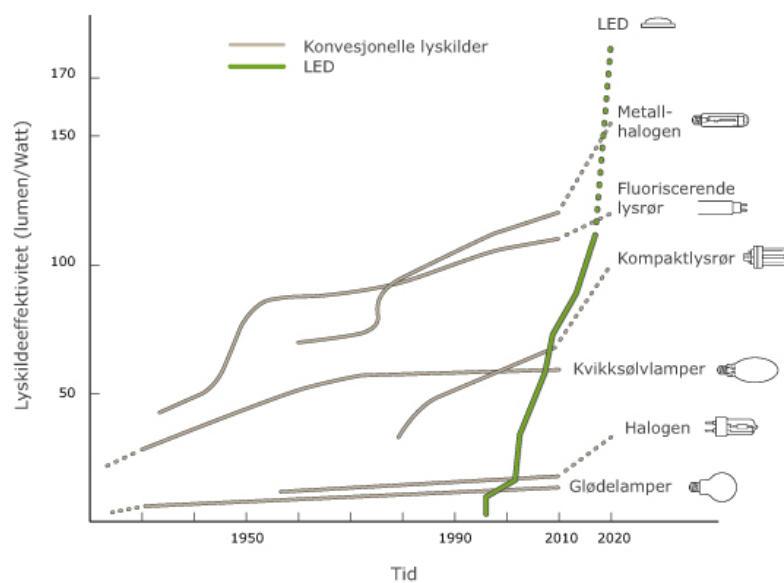


Figur 2.12: Typisk overharmonisk spektrum til strømmen tilført enfaset diodelikeretter med kondensator (THDi=130%) [2].

2.4.2 LED

Generelt om LED

LED er en forkortelse for Light Emitting Diode, og representerer en prinsipielt annen virkemåte enn andre konvensjonelle lyskilder som finnes på markedet. Lysdioden er en halvleder som under elektrisk påvirkning utstråler lys. LED-teknikken anses som belysningens fremtid og er i stadig utvikling [16].



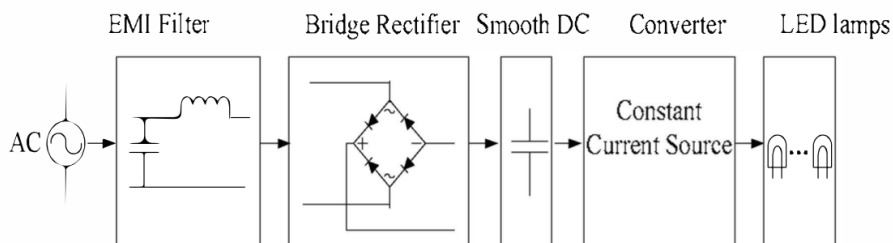
Figur 2.13: Utvikling lyskildeeffektivitet LED og andre konvensjonelle lyskilder [10].

LED-teknologien har utviklet seg raskt de siste 10-20 årene (figur 2.13). Fra å være en lyskilde med lavt lysutbytte, så har LED de seneste årene tatt over flere belysningsformål som tidligere var forbeholdt de tradisjonelle lyskildene som glødelamper, halogenlamper og lysrør. I tillegg til dette har LED mange andre fordeler sammenlignet med andre typer lyskilder, blant annet; lang levetid, mekanisk robuste, små dimensjoner, tåler kulde og kan gi energibesparelser [16].

Oppbygning og virkemåte til LED

Lysdioden består av et område med overskudd på elektroner (n-ledende) og et område med underskudd på elektroner (p-ledende). Lyset i dioden skapes ved at elektronene i de to områdene skaper balanse ved elektrisk påvirkning. Når likestrøm tilkobles lysdioden, utlignes denne skjevfordelingen av elektroner, som fører til at lys oppstår. Lysdioden drives altså med likestrøm, og krever derfor en forkobling eller ”driver”. Forkoblingen er en nødvendighet for at LED-armaturen skal lyse [7].

Figur 2.14 viser et blokkdiagram av forkoblingen til en typisk LED-lampe. Figuren viser et EMI-filter som skal blokkere støy fra den elektroniske kretsen, en likeretter med glattekondensator og en DC-DC-omformer som forsyner lysdiodene med en konstant DC-strøm. For at lysdiodene i LED-lampene skal fungere behøver de en konstant strømkilde fra en lavspent DC-kilde. Av den grunn er det nødvendig at en omformerer regulerer spenningen og kontrollerer strømmen som tilføres lysdiodene. Omformere som ”Buck”, ”Boost”, ”Flyback” og ”Resonant” er mye brukt til å forsyne LED [27]. Elektronikken i forkoblingen forårsaker ulineære strømtegn som kan injisere overharmoniske strømmer inn i elektriske installasjoner.



Figur 2.14: Blokkdiagram av elektronisk forkobling i LED-lamper [27].

LED-lamper (E27- og E14-sokkel) og LED-spotter (GU10-sokkel) har innebygd forkobling slik at de kan erstatte konvensjonelle lyskilder direkte. LED-lysrør fra kjente produsenter som Philips og Osram er designet for å kunne erstatte konvensjonelle lysrør direkte. Den eneste forutsetningen er at lysrør-armaturet har elektromagnetisk forkobling og ikke elektronisk forkobling.

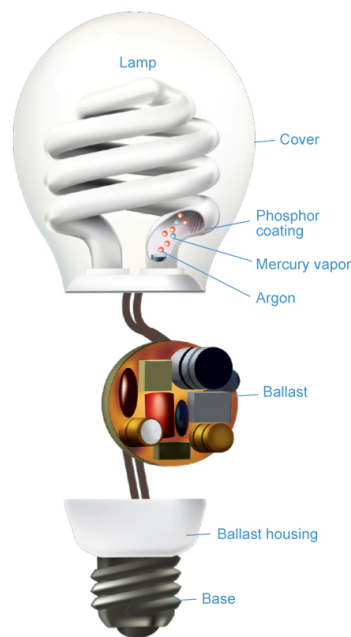
2.4.3 Fluorescerende lysrør

Både lysrøret og kompaktlysrør fungerer etter prinsippet om lavtrykksutladning. Ved påsatt spenning varmes elektrodene til lysrøret opp og emitterer elektroner. Disse elektronene kolliderer med gassatomene inni lysrøret slik at gassen ioniseres. Dette medfører at gassen blir elektrisk ledende og ultrafiolett stråling produseres. På innsiden av lysrøret omdanner et fluorescerende materiale den ultrafiolette strålingen til synlig lys. Lysrør har den egenskapen at jo mer strøm som flyter gjennom lysrøret, desto mindre blir den elektriske resistansen til lysrøret, som videre tillater mer strøm å flyte i røret. Hvis et lysrør hadde blitt direkte tilkoblet en strømforsyning med konstant spenning ville lysrøret ødelegges. For å unngå dette trengs det en forkobling [3].

Forkoblingen har som oppgave å regulere strømmen som flyter gjennom lysrøret slik at stabil lysutstråling oppnås, samt tilføre riktig spenning slik at en lysbue oppstår mellom de to elektrodene [22]. Det skilles hovedsakelig mellom elektronisk og elektromagnetisk (konvensjonell) forkobling. Tidligere var magnetisk forkobling det eneste alternativet, men armaturer med elektronisk forkobling har nå overtatt det meste av markedet. Blant annet har T5-røret forårsaket dette siden disse lysrørene er avhengig av elektronikk for å fungere. Lysrør med konvensjonell drift drives med 50 Hz vekselspenning og har magnetiske reaktorer, startere og kondensator (magnetisk forkobling). Elektroniske forkoblinger likeretter og omformer 50 Hz vekselspenning til høyfrekvent spenning med frekvens på ca. 35-40 kHz. De elektroniske forkoblingene er underlagt normen EN 61000-3-2/-3 for å begrense de overharmoniske som blir generert av elektronikken i forkoblingen [6].

2.4.4 Sparelamper (kompaktlamper)

Ønsket om å redusere energiforbruket i bygninger ved å ta i bruk mer energi-effektive lyskilder har resultert i stor interesse for å erstatte konvensjonelle glødelamper med sparelamper. Disse lampene har som regel skrusokkel slik at de kan erstatte glødelamper eller halogenlamper direkte. Sparelamper har en elektronisk forkobling (ballast) integrert i sokkelen som gir sparelampen ulineære strømmer karakteristikk. De ulineære strømmene som sparelampen trekker kan injisere overharmoniske strømmer inn i elektriske installasjoner, som videre kan forvrengte spenningen i systemet. Enkeltvis utgjør sparelamper en veldig liten last (typisk 5-30 W), men dersom et større antall sparelamper får virke sammen, kan den samlede effekten av alle disse små kildene anses som en stor støykilde [29]. Figur 2.15 viser typisk oppbygning til en sparelampe.



Figur 2.15: En sparelampes oppbygning [28].

2.5 Konsekvenser av overharmoniske strømmer

Harmoniske strømmer som flyter i elektriske anlegg kan medføre flere negative konsekvenser for både kabler og annet elektroteknisk utstyr. Noen av konsekvensene kan være [2][26]:

- Overbelastning av nøytralleder
- Økt tap og overoppheting av faseledere
- Forstyrrelse og havari av annet elektronisk utstyr
- Unødvendig utløsning av vern
- Motorer og generatorer kan oppleve større effekttap, høyere driftstemperaturer, og dermed større belastning på isolasjonen noe som kan føre til redusert levetid
- Overoppheting av transformatorer
- Overlast og tidligere aldring av kondensatorer

Den harmoniske sekvensen kan enten være positiv (+), negativ (-) eller null (0), som vist i tabell blabla [9].

Tabell 2.1: Harmoniske sekvenskomponenter [9].

Orden	1.h	2.h	3.h	4.h	5.h	6.h	7.h	8.h	9.h	...
Frekvens [Hz]	50	100	150	200	250	300	350	400	450	...
Sekvens	+	-	0	+	-	0	+	-	0	...

Harmoniske av positiv sekvens forsøker å få en motor til å gå raskere enn den grunnharmoniske, mens harmoniske av negativ sekvens forsøker å få motoren til å gå saktere enn den grunnharmoniske. Begge tilfellene bidrar til at motoren mister moment og varmes opp. Harmoniske av nullsekvens summeres i nøytrallederen, som kan medføre overbelastning av lederen [9].

Overbelastning av nøytralledere

I et trefaset system med nøytralleder returnerer summen av de tre fasestrømmene i nøytrallederen. De negative og positive sekvenskomponentene summeres til null i nøytralpunktet, men nullsekvenskomponentene summeres i

nøytrallederen som vist i figur 2.9, s. 11. Når 3. harmoniske strømmer (nullsekvensharmoniske) er tilstede i en installasjon kan strømmen i nøytrallederen overstige fasestrømmene. I for eksempel en kontorbygning med et stort antall datamaskiner, kan dette bli et problem hvis ikke nøytrallederen er riktig dimensjonert [11].

Økt tap og overoppheting av faseledere

Når strømmen som blir trukket av en last inneholder overharmoniske, vil RMS-verdien av strømmen (I_{rms}) være større en den grunnharmoniske strømmen (I_1). Uttrykket 2.14 viser dette [26]:

$$I_{rms} = I_1 \sqrt{1 + THD^2} \quad (2.14)$$

Siden tapene i en leder er en funksjon av strømmen som flyter i lederen, vil tapene øke med høyere I_{rms} .

Forstyrrelse og havari av annet elektronisk utstyr

Overharmoniske strømmer kan skape problemer for annet sensitivt utstyr oppbygget av elektronikk. Blant annet kan harmoniske strømmer føre til [2]:

- Forstyrrelse av elektronisk utstyr som er avhengig av å detektere forsyningsspennings nullgjennomgang. Når forsyningsspennings kurveform er forvrengt grunnet overharmoniske strømmer kan det oppstå flere nullgjennomganger pr halvsyklus enn det som er tilfellet for en ideell sinuskurve.
- Havari av komponenter som følge av økt maksimalverdi av forsyningsspenningen grunnet harmonisk forvrengning.
- Forstyrrelse og feil på inngangssignalet til kontrollsystemer.

Feilaktig utløsning av vern

Overharmoniske strømmer kan gi følgende forstyrrelser for vern [2]:

- Jordfeilbrytere summerer strømmene i fase- og nøytrallederne og løser ut hvis resultatet ikke er innenfor definerte grenseverdier. De overharmoniske strømmene kan føre til feil summering av strømmene slik bryteren løser ut feilaktig.

- Overharmoniske strømmer kan føre til at automatsikringer løser ut grunnet høyere strømmer enn det installasjonen er dimensjonert for.

Overoppheting av motorer og generatorer

Hovedproblemet med harmoniske strømmer og spenninger i elektriske maskiner er at driftstemperaturen øker med økende tap i kjernen og viklingene, som videre har innvirkning isolasjonen og levetiden til maskinene [2].

Overlast av kondensatorer

Overharmoniske strømmer og spenninger kan påvirke kondensatorer på følgende måte [2]:

- Økt toppspenning (peak) som følge av overharmoniske medfører høyere dielektrisk påkjenning for kondensatorene.
- Overharmoniske spenninger genererer ekstra overharmoniske strømmer som flyter gjennom kondensatorene. De overharmoniske strømmene øker med harmonisk orden som følge av at kondensatorens ekvivalente impedans ($Z_C \approx \frac{1}{j \cdot h \cdot \omega \cdot C}$) reduseres med økning i frekvensen. Dette kan resultere i overlast av kondensatoren.

2.6 Tiltak mot overharmoniske strømmer

I delkapittel 2.2 som omhandler EMC ble det nevnt at graden av elektromagnetisk forstyrrelse avhenger av interaksjon mellom de tre faktorene; kilden til forstyrrelsene, forbindelsen mellom komponentene (transmisjonsveien) og lasten som er sensitiv til forstyrrelse. Graden av overharmoniske forstyrrelser kan dermed reduseres ved å ta hensyn til de tre ovennevnte faktorene. I dette delkapittelet blir følgende aktuelle tiltak presentert:

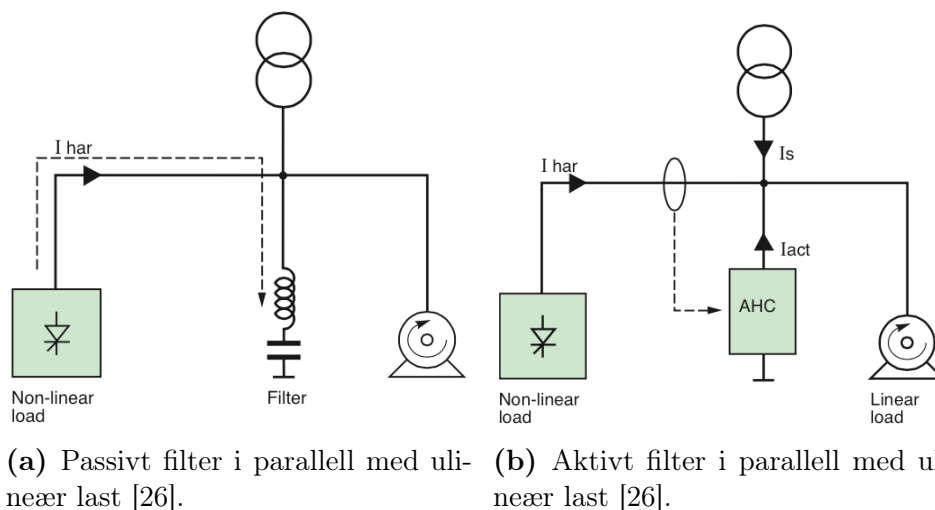
- Filter
- Reaktorer
- Modifikasjoner i installasjoner
- Overdimensjonering av utstyr og komponenter

2.6.1 Filter

Filter kan enten være en passiv eller aktiv komponent som blir plassert i en installasjon for å begrense mengden overharmoniske strømmer fra en støykilde. Et passivt filter har konstante komponenter og har som oppgave å filtrere forhåndstilpassede strømmer av overharmonisk orden. Det aktive filteret er derimot en elektronisk krets som tilpasser seg og filtrerer de spesifikke overharmoniske strømmene som en støykilde genererer. Filtrene kan enten installeres i parallell eller i serie med støykilden [2].

Parallellfilter

Et passivt filter i parallell med støykilden kan eliminere overharmoniske strømmer i installasjonen, samt kompensere reaktiv effekt slik at den totale lasten til systemet reduseres [2]. Figur 2.16a viser et passivt filter (LC-krets) i parallell med den ulineære lasten. Det passive filteret kobles på terminalen til den ulineære lasten og tilpasses de overharmoniske av orden h som blir generert av lasten. Ideelt sett flyter de overharmoniske strømmene kun til filteret og ikke i resten av installasjonen [2].



Figur 2.16: Aktivt og passivt filter i parallell med ulineære last [26].

Et aktivt filter kan også parallellkobles på terminalen til en ulineær last som behøver reduksjon av overharmonisk emisjon (figur 2.16b). De aktive filtrene måler de overharmoniske strømmene generert av den ulineære lasten og injiserer overharmonisk strøm med motsatt fase inn i systemet. Dermed utlignes de overharmoniske strømmene og tilførselstrømmen forblir sinusformet [26].

Seriefilter

Seriefilter har som oppgave å endre impedansen i tilførselskretsen slik at impedansen økes for spesifikke overharmoniske strømmer. Seriefilterets ekvivalente impedans bør ha følgende egenskaper [2]:

- Nær null for den grunnharmoniske strømmen slik at impedansen ikke påvirker overføringen av elektrisk energi fra kilden til lasten.
- Høy impedans for de overharmoniske som skal filtreres slik at disse blokkeres.

Både passive og aktive filtre kan installeres i serie med den ulineære lasten. Det passive filteret er en LC-krets med konstante parametere, mens impedansen til det aktive filteret blir kontrollert av en elektronisk krets [2].

2.6.2 Reaktorer

Linjereaktorer kan brukes til å redusere overharmoniske verdier ved at impedansen i tilførselskretsen øker og dermed reduserer de overharmoniske strømmene. Reaktorens impedans er direkte proporsjonal med frekvensen, og derav høyere ved høyere frekvens [26].

2.6.3 Modifikasjoner i installasjonen

Plassere ulineære laster oppstrøms i anlegget

Graden av overharmonisk forstyrrelse som en ulineær last skaper er svært avhengig av kortslutningsytelsen. Jo høyere kortslutningsytelse, desto mindre blir graden av overharmonisk forstyrrelse. Kortslutningsytelsen i en installasjon reduseres med økende avstand til transformatoren i et anlegg. Dermed kan graden av overharmonisk forstyrrelse reduseres ved å plassere den ulineære lasten så langt oppstrøms i installasjonen som mulig [26].

Samle støykilder på samme kurs

For å redusere graden av forstyrrelse fra de ulineære lastene til andre sensitive laster i en installasjon kan det være en idé å samle de ulineære lastene på samme kurs [26]. Eksempelvis kan sensitiv elektronikk og datalaster fordeles på separate kurser.

Separat transformator til støykilder

Et annet tiltak for å dempe graden av forstyrrelse fra ulineære laster til andre sensitive laster kan være å installere en egen transformator til de ulineære lastene. Ulempen med dette alternativet er imidlertid at kostnadene øker betraktelig ved å installere en ekstra transformator. Videre kan ulike typer transformatorkoblinger eliminere spesifikke overharmoniske strømmer [26]:

- Dy-dkobling eliminerer 5. og 7. harmoniske
- Dy-kobling eliminerer 3. harmoniske
- DZ-kobling eliminerer 5. harmoniske

2.6.4 Overdimensjonering

Andre tiltak som kan gjøres under planleggingen av et elektrisk anlegg er å overdimensjonere komponenter og utstyr slik at konsekvensene av overharmoniske strømmer ikke blir like store [2]. Dette er ikke et tiltak som reduserer graden av emisjon fra en ulineær kilde, men reduserer sannsynligheten for overoppheting og overlast av transformatorer, kabler og andre komponenter. Noen tiltak kan være [2]:

- Overdimensjonere transformatorer for å kompensere for de ekstra tapene i transformatoren som blir generert av overharmoniske strømmer.
- Overdimensjonere kabler siden kabelens strømføringssevne er avhengig av den varmen kabelen kan avlede i driftssituasjoner. Ved overharmoniske strømmer i lederen vil tapene øke og derav øker varmeavgivelsen fra lederen. Ved kabeldimensjonering gir NEK400:2014 korreksjonsfaktorer (se tabell 2.6, s. 30) for å kompensere for de 3. harmoniske strømmene i en kabel.
- Overdimensjonere motorer for å kompensere for de ekstra tapene og den økende temperaturen i motoren som skyldes overharmoniske strømmer.

2.7 NEK EN61000-3-2:2014

2.7.1 Generelt

Målet med standarden NEK EN61000-3-2:2014 er å sette begrensninger på harmonisk emisjon fra elektrisk og elektronisk utstyr, for å sikre at harmonisk forstyrrelse ikke overstiger kompatibilitetsgrensene definert i IEC 61000-2-2. Standarden er begrenset til å gjelde for elektrisk og elektronisk utstyr med inngangsstrøm til og med 16 A per fase med tiltenkt tilkobling til lavspenningsnettet. Det elektriske og elektroniske utstyret er klassifisert i klasser fra A til D, som vist i punktlisten nedenfor [19]:

- Klasse A
 - balansert trefase-utstyr
 - husholdningsapparater, eksklusiv utstyret i klasse D
 - verktøy, eksklusiv bærbart verktøy
 - dimmere for glødelamper
 - lydutstyr
- Klasse B
 - bærbart verktøy
 - sveiseutstyr, som ikke er profesjonelt utstyr
- Klasse C
 - belysningsutstyr
- Klasse D
 - PC og PC-monitor
 - TV-mottakere
 - kjøleskap og fryserer med en eller flere VSD (variable speed drives) for å kontrollere kompressoren(e)

2.7.2 Overharmoniske grenseverdier

Denne oppgaven er avgrenset til å kun omhandle overharmoniske bidrag fra utstyr klasse C (belysningsutstyr) og klasse D (PC-er og PC-monitorer), og

dermed vil ikke grenseverdiene til utstyr av klasse A og B omtales nærmere.

Utstyr klasse C

Tabell 2.2 viser grenseverdier for utstyr klasse C (belysningsutstyr) med aktiv effekt ≥ 25 W.

Tabell 2.2: Grenseverdier for utstyr klasse C med aktiv effekt ≥ 25 W [19].

Harmonisk orden, h	Maksimal tillatt harmonisk strøm, uttrykt som prosent av inngangsstrømmen ved grunnharmonisk frekvens [%]
2	2
3	$30 \cdot \lambda$
5	10
7	7
9	5
$11 \leq h \leq 39$	3

der λ er kretsens power factor

For utstyr klasse C med aktiv effekt ≤ 25 W, gleder følgende [19]:

- de harmoniske strømmene skal ikke overstige verdiene gitt i tabell 2.3, eller:
- de 3. harmoniske, uttrykt som en prosent av den grunnharmoniske strømmene, skal ikke overstige 86 %. De 5. harmoniske skal ikke overstige 61 %. Kurveformen til inngangsstrømmen har følgende krav, referert til nullpunktsgjennomgangen til den grunnharmoniske forsyningsspenningen:
 - skal nå 5 % strømterskel før eller ved 60° ,
 - skal ha toppverdi (peak) før eller ved 65° ,
 - og skal ikke falle under 5 % av strømterskel før 90° .

Tabell 2.3: Grenseverdier for utstyr klasse C med aktiv effekt ≤ 25 W [19].

Harmonisk orden, h	Maksimalt tillatt harmonisk strøm per watt [mA/W]
3	3,4
5	1,9
7	1,0
9	0,5
11	0,35
$13 \leq h \leq 39$	$\frac{3,85}{h}$

Utstyr klasse D

For utstyr klasse D (bla. PC-er og PC-monitorer) gjelder grenseverdiene i tabell 2.4.

Tabell 2.4: Grenseverdier for utstyr klasse D [19].

Harmonisk orden, h	Maksimalt tillatt harmonisk strøm per watt [mA/W]	Maksimalt tillatt harmonisk strøm [A]
3	3,4	2,30
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,5	0,40
11	0,35	0,33
$13 \leq h \leq 39$	$\frac{3,85}{h}$	$0,15 \frac{15}{h}$

2.8 NEK400:2014 Tillegg 53K (informativt)

I NEK400:2014 tillegg 53K er det presentert en tabell med sannsynlige virkninger av total harmonisk spenningsforvrengning (THDu) og total harmonisk strømforvrengning (THDi) i elektriske anlegg. Verdiene i tabellen er veiledende for å kunne beslutte om harmonisk overvåkningsutstyr er nødvendig i installasjoner hvor forbrukerapparater sannsynligvis vil generere høye nivåer av overharmoniske strømmer. De ulike harmoniske nivåene og tilhørende sannsynlige uheldige virkninger er gjengitt i tabell 2.5.

Tabell 2.5: Harmonisk nivå og sannsynlige uheldige virkninger, NEK400:2014 [18]

THDu	THDi	Sannsynlige uheldige virkninger
$\geq 8\%$	$\geq 50\%$	Stor forvrengning, feilfunksjon forventet
$5\% \leq \text{THDu} < 8\%$	$10\% \leq \text{THDi} < 50\%$	Signifikant forvrengning, mulige feil kan oppstå
$< 5\%$	$< 10\%$	Ingen, ansett som normale harmoniske verdier

2.9 Dimensjoneringskriterier etter NEK400:2014

Dimensjoneringskriterier av nøytralleder med hensyn på overharmoniske strømmer blir nevnt ved flere anledninger i NEK400:2014. I dette delkapittelet blir deler av avsnitt i NEK400:2014 som omhandler dimensjonering av N-leder på bakgrunn av overharmoniske strømmer gjengitt.

524.2 Ledertverrsnitt for nøytralledere [18]

524.2.1 Ledertverrsnittet på en eventuell nøytralleder skal være \geq ledertverrsnittet faseledere i:

- énfase kurser med to ledere uansett ledertverrsnitt; og
- trefasekurser hvor det er sannsynlig med trippelharmoniske strømmer og hvor $THDi$ er mellom 15% og 33%.

523.6 Antall belastede ledere [18]

523.6.4 (...) Hvis den harmoniske andelen er høyere enn 15 % av fasestrømmen, skal ledertverrsnittet for nøytrallederen ikke være mindre enn ledertverrsnittet for faselederne. Den termiske virkningen pga. tilstedeværelsen av trippelharmoniske strømmer og de tilsvarende reduksjonsfaktorer for større harmoniske strømmer er gitt i Tillegg 52D.

Tillegg 52D (normativt) – Virkningen av harmoniske strømmer i symmetriske trefasesystemer [18]

Dette tillegget har til hensikt å dekke situasjonen hvor det flyter strøm i nøytrallederen i et symmetrisk belastet trefasesystem. Slike nøytrallederstrømmer oppstår fordi fasestrømmene har et innhold av harmoniske som ikke nulles ut i nøytrallederen. Den mest signifikante harmoniske som ikke nulles ut er vanligvis tredje harmoniske. Størrelsen av den tredje harmoniske strømmen i nøytrallederen kan overstige størrelsen av den grunnharmoniske fasestrømmen. I slike tilfeller vil nøytrallederstrømmen ha en signifikant innflytelse på strømføringsveien for kablene i kursen.

Reduksjonsfaktorene definert i tabell 2.6 gjelder kun for kabler hvor nøytrallederen er i en 4- eller 5-lederkabel og er av samme ledermaterial og har samme ledertverrsnitt som faselederne. Disse reduksjonsfaktorene er utregnet på basis av tredje harmoniske strømmer. Hvis et signifikant bidrag, $> 15\%$, av harmoniske strømmer forventes (for eksempel 9. eller 12. harmoniske), gjelder lavere reduksjonsfaktorer. Dersom det er en ubalanse mellom fasestrømmene på mer enn 50 % vil også lavere reduksjonsfaktorer gjelde.

De tabulerte reduksjonsfaktorene vil, når de anvendes for å finne strømføringsevne for en kabel med tre belastede ledere, gi en strømføringsevne for en kabel med fire belastede ledere hvor strømmen i den fjerde lederen er pga. harmoniske. Reduksjonsfaktorene tar også i betraktning virkningen av oppvarmingen pga. harmonisk strøm i faselederne.

Dersom nøytrallederstrømmen forventes å bli høyere enn fasestrømmen, skal kabelens ledertverrsnitt velges på basis av nøytrallederstrømmen.

Tabell 2.6: Reduksjonsfaktor for harmoniske strømmer i 4 og 5-lederkabler [18].

3. harmoniske innhold i fasestrømmen % av den grunnharmoniske	Reduksjonsfaktor	
	Ledertverrsnitt valgt på basis av fasestrøm	Ledertverrsnitt valgt på basis av nøytrallederstrøm
0-15	1,0	-
15-33	0,86	-
33-45	-	0,86
>45	-	1,0

Merknad - 3. harmonisk strøm i forhold til den lineære fasestrømmen (første harmoniske), uttrykt i %, og ikke rms-strømmen [18].

2.10 Forskrift om leveringskvalitet

Forskrift om leveringskvalitet (FoL) er fastsatt av Norges vassdrags- og energidirektorat for å sikre en tilfredsstillende leveringskvalitet av elektrisitet i det norske kraftsystemet. FoL inneholder krav og grenseverdier knyttet til tekniske forhold om spenningskvalitet og leveringskvalitet. Forskriften gjelder for brukere, eiere og driftere av elektriske anlegg eller utstyr som er tilkoblet det norske kraftsystemet. Forskriften stiller krav til maksimal total harmonisk forvrengning av spenningsens kurveform ($\%THD_u$) og individuelle overharmoniske spenninger ($\%U_h$). Nettselskapet skal sørge for at total harmonisk forvrengning av spenningsens kurveform ikke overstiger 8% og 5%, målt som gjennomsnitt over henholdsvis ti minutter og én uke, i tilknytningspunkt med nominell spenning fra og med 230 V til og med 35 kV. Nettselskapet skal også sørge for at de individuelle overharmoniske spenningene ikke overstiger verdiene gitt i tabell 2.7, målt som gjennomsnitt over ti minutter, i tilknytningspunkt med nominell spenning fra og med 230 V til og med 35 kV. Kunden er utbedringsansvarlig dersom kundens anlegg eller utstyr forårsaker forstyrrelser for andre nettkunder eller nettselskapets anlegg slik at FoL ikke kan overholdes [15].

Tabell 2.7: Grenseverdier til individuelle harmoniske forvrengninger for hvert multiplum av den grunnharmoniske frekvensen i spenningsområdet 230 V til 35 kV [15].

Odde harmoniske				Like harmoniske	
Ikke multiplum av 3		Multiplum av 3			
Orden h	U_h	Orden h	U_h	Orden h	U_h
5	6,0%	3	5,0%	2	2,0%
7	5,0%	9	1,5%	4	1,0%
11	3,5%	>9	0,5%	>4	0,5%
13	3,0%				
17	2,0%				
19, 23, 25	1,5%				
>25	1,0%				

Kapittel 3

Metode

Et stort antall enkeltlaster som består av elektronikk bidrar til økt fleksibilitet med tanke på energiforbruk i bygninger, men introduserer samtidig en utfordring med tanke på overharmoniske strømmer og spenninger. Ved blant annet prosjektering av nye elektriske installasjoner eller tilstandskontroll av allerede eksisterende anlegg i bygninger er det av stor betydning å ha tilgang til informasjon om karakteristikker og funksjoner til enkeltkomponenter, samt hvordan et større antall potensielle ”støykilder” samlet kan påvirke en elektroinstallasjon. Med dette som utgangspunkt er det foretatt følgende målinger og undersøkelser:

- Laboratoriemålinger for å kartlegge hvilke overharmoniske strømmer potensielle ”støykilder” genererer.
- Målinger på elektriske anlegg i kontor- og undervisningsbygg for å kartlegge typiske overharmoniske strømmer og spenninger i stige kabler og enkeltkurser som forsyner ulineære lastkilder.

Denne oppgaven er avgrenset til å omhandle ulineære lastkilder det som regel er en stor andel av i for eksempel kontor- og undervisningsbygg. Større ulineære industrielle 3-faselaster som sveiseapparater, lysbueovner, samt utstyr med magnetisk kjerne (transformatorer, elektriske motorer og generatorer) og UPS-systemer er utelatt fra denne oppgaven.

Måleutstyret som ble benyttet til innsamling av måledata er måleutstyr som er tilgjengelig på servicelaben ved institutt for elkraftteknikk (se vedlegg A). I de etterfølgende delkapitlene beskrives målemetode, hvilke måleutstyr som ble benyttet, samt informasjon om enkeltkomponenter og bygninger det ble foretatt målinger på.

3.1 Laborieforsøk

Målingene på enkeltkomponenter ble utført i laboratoriet for elektroinstallasjoner og lysteknikk ved NTNU Gløshaugen. Det ble utført målinger på bærbare datamaskiner, PC-monitører og diverse lyskilder som LED, sparelamper og lysrør. Disse forholdsvis små enkeltlastene er det som regel en stor tetthet av i kontor- og undervisningsbygg, noe som gjør en kartlegging av overharmonisk bidrag fra disse ulineære lastkildene interessant. Videre i dette underkapittelet blir det presentert måleoppsett for laborieforsøk, hva som skal måles og informasjon om hvert testobjekt.

3.1.1 Måleutstyr og måleteknikk

Alle laboriemålingene ble utført med effektanalysatoren Fluke 43 og strømtangen Fluke 80i-110s (figur 3.1). Dette måleinstrumentet kan blant annet måle strøm, spenning, effekt og overharmoniske enkeltkomponenter.



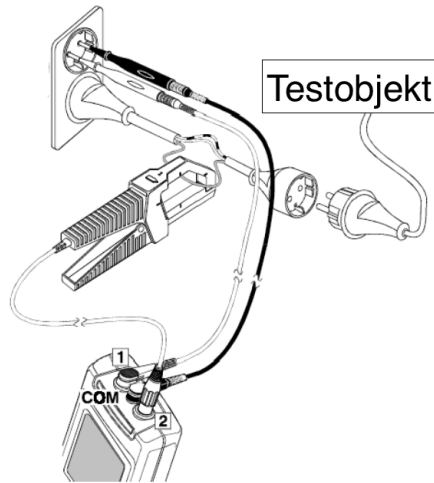
Figur 3.1: Effektanalysator Fluke 43 [31] og strømtang Fluke 80i-110s [4].

Punktlisten viser hva som ble målt for hvert testobjekt.

- I_{rms} [A] - effektivverdien av fasestrømmen
- I_{fund} [A] - den grunnharmoniske fasestrømmen
- THD [%fund] - total harmonisk forvrengning av strømmen med hensyn på grunnharmonisk strøm
- THD [%rms] - total harmonisk forvrengning av strømmen med hensyn på effektivverdien av strømmen

- De harmoniske komponentene i forhold til grunnharmonisk og RMS-strøm: 3.h, 5.h, 7.h, 9.h, ... , 21.h [%]
- Strømmen og spennings kurveform
- U_{rms} [V] - effektivverdien av spenningen

Figur 3.2 viser måleoppsettet for laboratoriemålingene. For å måle fasestrømmen ble det benyttet strømtangen Fluke 80i-110s, og en skjøteledning der den ytterste isolasjonen var fjernet. Strømtangen ble plassert over en av faselederne, og to måleprober ble benyttet for å måle spenningen i stikkkontakten som testobjektet ble tilkoblet. All måledata ble overført fra effektanalysatoren til en datamaskin. Resultatene ble deretter analysert i FlukeView programvare.



Figur 3.2: Oppkobling av måleutstyr [8].

Alle målingene på testobjektene ble utført to ganger og under like forhold for å utelukke eventuelle målefeil. Målingene på datamaskinene ble utført når datamaskinene var ca. 50% fulladet og tilkoblet den tilhørende strømforsyningsenheten. Alle de bærbare datamaskinene var aktive, men kjørte ikke krevende programvare under forsøkene da dette har innvirkning på strømforsyningen og dermed generering av overharmoniske strømmer [17]. Under målingene av PC-monitorene var disse tilkoblet en datamaskin og aktive under hele måleperioden. Når det gjelder målinger av lyskildene ble disse slått på i god tid før målingene slik at lyskildene fikk tid til å stabilisere seg.

3.1.2 Testobjekter

Bærbare datamaskiner

Testobjektene av bærbare datamaskiner er produkter fra Apple, ASUS, DELL og Lenovo som er kjente leverandører av datamaskiner. Fire av fem testobjekter med tilhørende strømforsyningsenhet er fra 2010 eller nyere. PC 3 er imidlertid fra 2007. Utvalget er valgt på basis av hva som var tilgjengelig og praktisk gjennomførbart. I tillegg til målinger på bruk av kun én datamaskin, ble det også utført målinger på bruk av to, tre og fire stykk av PC 2 samtidig. Disse målingene ble foretatt for å kartlegge eventuelle endringer i overharmoniske strømmer ved bruk av et økende antall datamaskiner på samme kurs. Tabell 3.1 viser en oversikt over test-id, produktnavn og serienummer til hvert enkelt testobjekt.

Tabell 3.1: Oversikt testobjekter bærbare datamaskiner.

ID test-objekt	Produktnavn	Serienr.	Bilde
PC 1	Macbook Pro 2010	A1278	
PC 2	ASUS Eee PC 1101HA	-	
PC 3	DELL Latitude D630	-	
PC 4	Lenovo Yoga 2 PRO	YB02002660	
PC 5	Asus K53E	C3N0AS714280138	

PC-monitorer

Testobjektene av PC-monitorer er også produkter fra kjente leverandører som Acer, Samsung, AOC og BENQ. Monitorene og de tilhørende strømforsyningsenhetene er av nyere årstall. Tabell 3.2 viser en oversikt over test-id, produktnavn og serienummer til testobjektene.

Tabell 3.2: Oversikt testobjekter PC-monitorer.

ID testobjekt	Produktnavn	Serienr.
PC mon 1	AOC E2461Fwh LED	FGVE2HA025330
PC mon 2	Acer LCD Monitor G246HL	MMLWAEE018421126288568
PC mon 3	Samsung S24D340	-
PC mon 4	BENQ GW2450HM LED	-

Lyskilder


Styring og regulering av enkeltkilder i form av dimming er ikke betraktet i denne oppgaven. Begrunnelsen for dette er at generering av overharmoniske strømmer da er svært avhengig av dimmeutstyret og hvilket dimmeprinsipp som er valgt [14]. Alle testene av lyskildene er derfor utført med 100 % strømtilførsel.

Testobjektene er produkter fra kjente leverandører av lyskilder som Philips og Osram, samt lyskilder fra mindre kjente belysningsleverandører som Megaman og Ikea. Det er foretatt målinger på:

- Syv ulike LED-lamper (E27- og E14-sokkel) med nominell effekt fra 4,5 W til 10 W. Disse lampene har en elektronisk forkobling ("driver") integrert i lampen.
- Fem LED-spotter (GU10-sokkel) med nominell effekt fra 3,6 W til 8 W. Disse spottene har også "driveren" integrert i spotten.
- Fire sparelamper (E27- og E14-sokkel) med nominell effekt fra 5 W til 23 W. Også disse lampene har en elektronisk forkobling integrert i lampen.
- Fire LED-lysrør (G13) som erstatning til vanlige T8 lysrør. Nominell effekt fra 20 W til 22 W. Disse lyskildene fungerer kun i lysrørramaturer med konvensjonell forkobling. Egne tennere medfølger LED-lysrørene.

- Ett fluorescerende T8-lysrør (G13) med nominell effekt 36 W for å sammenligne overharmoniske strømmer fra dette og LED-lysrørene.
- To fluorescerende T5-lysrør med nominell effekt 28 W pr. stk.
- Én referanselyskilde med E27-sokkel. Referanselyskilden er i denne oppgaven en lyskilde som LED og sparelamper typisk vil erstatte. Referanselyskilden blir ansett som en lineær last og skal i teorien ikke inneholde overharmoniske strømkomponenter. Det ble foretatt målinger på referanselyskilden for å bevise forskjellene mellom referanselyskilden, LED og sparelamper med tanke på ulineære strømkaraktistikker. Tradisjonelle glødelamper er ikke benyttet som referanselyskilde da disse fases ut av markedet [23]. Det er derfor benyttet en halogenlampe som referanselyskilde.

Tabell 3.3: Oversikt over referanselyskilde.

ID testobjekt	Produktnavn	Bilde	Nominell effekt [W]
HALO E27 1	Philips 42W ECO Classic Warm White halogenlampe		42

Tabell 3.4: Oversikt testobjekter LED E14.

ID testobjekt	Produktnavn	Bilde	Nominell effekt [W]
LED E14 1	Megaman LED Classic 2800K		5
LED E14 2	Megaman LED Candle 2500K		4,5





Tabell 3.5: Oversikt testobjekter LED E27.

ID testobjekt	Produktnavn	Bilde	Nominell effekt [W]
LED E27 1	Osram Parathom Classic A 60 Advanced 806lm 2700K E27 Matt		10
LED E27 2	Osram Parathom Classic A 60 Advanced 806lm 2700K E27 Klar		10
LED E27 3	Osram Parathom Classic A 40 Advanced 470lm 2700K E27 Klar		6
LED E27 4	Megaman LED PAR20 2800K		8
LED E27 5	Megaman LED Mellotone 2400K		8

Tabell 3.6: Oversikt testobjekter LED GU10.

ID testobjekt	Produktnavn	Bilde	Nominell effekt [W]
LED GU10 1	Osram LED Parathom GU10 230lm 2700K		3,6
LED GU10 2	Osram LED Parathom GU10 350lm 2700K		5,3
LED GU10 3	Megaman Dimmeable LED Reflector PAR16 LR2008d-50H35D-GU10-2800K		8
LED GU10 4	Megaman LED Reflector Par16		7
LED GU10 5	IKEA LED1001R4 4W GU10 MR16		4

Tabell 3.7: Oversikt testobjekter sparelamper E27 og E14.

ID testobjekt	Produktnavn	Bilde	Nominell effekt [W]
CFL E27 1	Philips Master PL Electronic 23W/827		23
CFL E27 2	IKEA 11W GSU111 531 lm		11
CFL E14 1	Osram Dulux Superstar 5W 2500K E14		5
CFL E14 2	Philips Genie 5W 230lm Warm White		5

Tabell 3.8: Oversikt testobjekter lysrør (LED ST8, fluorescerende T5- og T8 lysrør.)

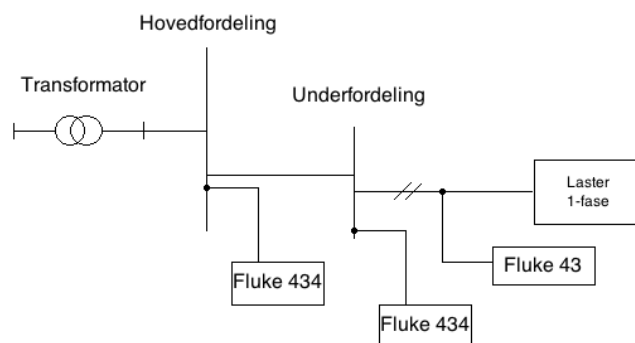
ID testobjekt	Produktnavn	Nominell effekt [W]
LED ST8 1	Osram LED SubstiTUBE Value ST8-HV4-170-840 1200mm G13	20
LED ST8 2	Philips CorePro LEDtube T8 840 1200mm G13	20
LED ST8 3	Osram LED SubstiTUBE Value ST8-HV5-200-840 1500mm G13	22
LED ST8 4	Philips MAS LEDtube VLE 1200mm 840 T8C ROT	20
FL T8 1	Osram Lumilux Warm White L 36W/31-830 G13	36
FL T5 1	2 stk. Philips Master TL5 HE 28W/830	2x28

3.2 Målinger på anlegg

Strøm- og spenningsmålinger ble foretatt i hovedfordelinger, underfordelinger og på enkeltkurser i tre ulike bygg. Det ble foretatt målinger på kontor- og undervisningsbygg for å få en bedre forståelse av hvordan et større antall ulineære lastkilder på samme kurs påvirker strøm- og spenninger i elektroinstallasjoner. Det er i denne oppgaven fokusert på enkeltkurser som forsyner diverse lyskilder som potensielt kan generere overharmoniske strømmer og spenninger, samt stikkontaktkurser til datautstyr. Det ble også foretatt målinger på stigekabler som forsyner underfordelinger til lyskurser og teknisk utstyr.

3.2.1 Måleutstyr og måleteknikk

Målingene ble utført i normal arbeidstid (mellom 08:00 og 16:00) da det er mest sannsynlig at belastningen er størst. Bruken av byggene kan være ulik avhengig av hvilken virksomhet bedriften driver, men i de fleste tilfeller vil hovedvekten av tilstedeværelse være innenfor normal arbeidstid. I store kontor- og undervisningsbygg vil belastningen variere svært mye gjennom en dag. På bakgrunn av dette skulle måleutstyret aller helst målt over lengre perioder, gjerne ei hel uke eller flere dager, i hvert målepunkt. Dette ville gitt et bedre innblikk i strøm- og spenningsendringer over et lengre tidsperspektiv, samt redusert sjansene for målefeil. Dette var dessverre ikke mulig å gjennomføre grunnet begrenset tilgang på måleutstyr. Hver enkelt måling på stigekabler og kurskabler ble imidlertid målt over en periode på 5-10 minutter for å forsøke å redusere sjansene for å måle unaturlige strøm- og spenningsverdier i hvert målepunkt. Måleoppstillingen er vist i figur 3.3.



Figur 3.3: Måleoppsett feltmålinger.

Av figuren fremkommer det at målinger av overharmoniske strømmer og spenninger på stigekabler ble foretatt med Fluke 434 Three Phase Power Quality Analyzer (bilde 3.4). Strømtengene ble satt over fasene L1, L2, L3 og nøytralleder. Spenningen ble målt ved å tilkoble magnetprober på jordlederen, nøytrallederen og fasene L1, L2 og L3.



Figur 3.4: Energianalysator Fluke 434 [31].

Målingene på enkeltkurser ble utført i underfordelinger med måleapparatet Fluke 43 og tilhørende strømtang. Strømtangen ble heftet over faselederen og spenningen på enkeltkurser ble målt ved hjelp av magnetprober tilkoblet sikringen til de utvalgte kursene.

Følgende målinger ble utført på både stigekabler og enkeltkurser:

- I_{rms} [A] - effektivverdien av fasestrømmen(e)
- THD [%fund] - total harmonisk forvrengning av strøm og spenning med hensyn på grunnharmonisk strøm og spenning
- THD [%rms] - total harmonisk forvrengning av strøm og spenning med hensyn på effektivverdien av strøm og spenning
- De harmoniske komponentene i forhold til grunnharmonisk og RMS: 3.h, 5.h, 7.h, 9.h, ... , 21.h [%]
- Strømmen og spenningens kurveform
- U_{rms} [V] - effektivverdien av spenningen(e)

3.2.2 Utvalgte bygg

Elektrobygget, NTNU Gløshaugen

Et av de utvalgte byggene var Elektrobygget ved NTNU Gløshaugen. Det ble utført målinger på to ulike underfordelinger i 3. etg. i henholdsvis E- og F-blokken. Etasjen består i all hovedsak av kontor-, møterom og lesesaler. Nettsystemet i bygningen er TN-S og oppbygningen av fordelingsnett i E- og F-blokken er radiell. Stigekablene som det ble foretatt målinger på forsyner elektrisk kraft til lys og teknisk utstyr i etasjen. Kursinndelingen til forbruksapparater er funksjonell oppdeling, der for eksempel en lyskurs forsyner lysarmaturer i flere rom.



Figur 3.5: Elektrobygget NTNU [21].

I en tidligere masteroppgave [33] ved NTNU fra 2010 ble det foretatt målinger på stigekabelen i 3. etg i E-blokken. Siden den gang er belyningsanlegget og ventilasjonsanlegget byttet ut. Blant annet er lyskildene på kontorer, i korridorer og møterom byttet til LED. Det er dermed interessant å studere eventuelle endringer i overharmoniske strømmer og spenninger i elektroinstallasjonen.

Brattørkaia 15, Trondheim

Brattørkaia 15 er et kontorbygg i Trondheim på totalt 20 000 kvadratmeter. Bygget ble ferdigstilt i 2013 og er et passivhus med energiklasse A. Oppvarming av bygget skjer ved hjelp av fjernvarme. Både luft og lys blir regulert automatisk med sensorer, og alle belysningsløsninger er levert av Glamox Luxo Lighting. Bygget har flest cellekontorer, men også åpne kontorlandskap. I cellekontorene er det benyttet Reed 1x80W pendelarmaturer med dagslyssensorer og i kontorlandskapet er det benyttet det samme lysarmaturet med DALI forkobling. I glassgården i bygget er det benyttet ca. 50 stk. Glamox i75 LED armatur [32].

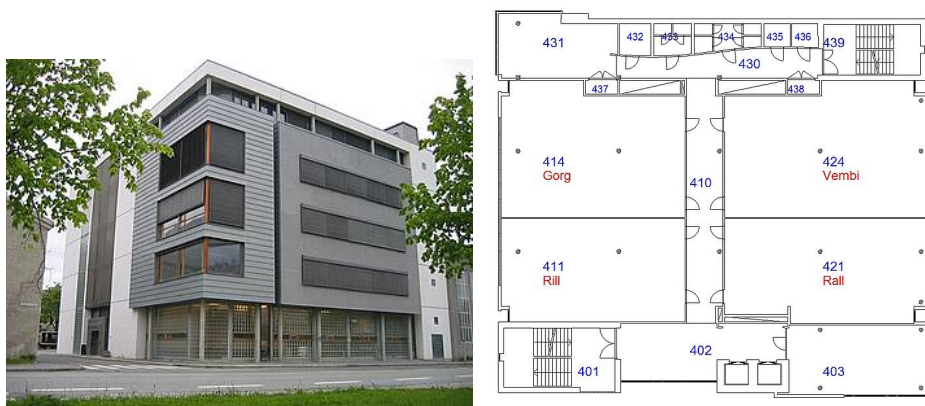


Figur 3.6: Kontorlandskap Brattørkaia 15 [32].

Målingene på dette ble utført på bakgrunn av at bygget er et relativt nytt passivhus. Da bygget er et passivhus og benytter fjernvarme til oppvarming er det grunn til å tro at andelen ohmske laster i bygningen er relativt lav. Dette kan medføre betydelige overharmoniske strømmer og spenninger i installasjonen, siden ohmske laster i utgangspunktet demper harmoniske verdier [13]. Målinger på stigekabler var dermed av interesse for å kartlegge overharmoniske strømmer i stigekabler til underfordelinger. I tillegg hadde bygget en glassgård med et stort antall LED-armaturer. Målinger på lyskursene som forsynte LED-armaturene var dermed av interesse for å få et innblikk i eventuelle virkninger på strøm og spenning av et stort antall LED-armaturer.

P15-bygget, NTNU Gløshaugen

P15-bygget ved NTNU Gløshaugen er et bygg som blant annet består av et stort antall datasaler. Det ble foretatt målinger i underfordeling +F4.100 i 4. etasje, som forsyner teknisk og lys. Etasjen består hovedsakelig av fire store datasaler med et stort antall stasjonære datamaskiner og PC-monitorer som opptar det meste av arealet i etasjen (figur 3.7). Nettsystemet i bygningen er 230/400 V TN-C-S og individuelle stige kabler går fra hovedfordelingen til underfordelingene i etasjene.



Figur 3.7: Romoversikt P15-bygget [20].

P15-bygget ble valgt for å kartlegge overharmoniske strømmer og spenninger i en installasjon med en høy tetthet av datamaskiner på et relativt begrenset areal. Målingene skulle gi et innblikk i hva som kunne forventes av overharmoniske verdier i en stige kabel som forsyner en etasje med fire store datasaler, samt overharmoniske verdier på enkeltkurser til stikkontakter i datasalene.

Kapittel 4

Resultater

I dette kapitlet blir resultatene av laboratoriemålingene på enkeltkomponenter og målinger på anlegg presentert. I delkapittel 4.1 blir resultatene av laboratoriemålingene presentert, mens måledataen fra de utvalgte anleggene er presentert i delkapittel 4.2.

4.1 Resultater av laboratoriemålinger

Tabellene som viser resultater av laboratoriemålingene presenterer kun strømverdier for hvert testobjekt. Det ble også utført spenningsmålinger uten at noen nevneverdige resultater ble funnet. Spenningsverdiene er derfor ikke presentert i denne rapporten.

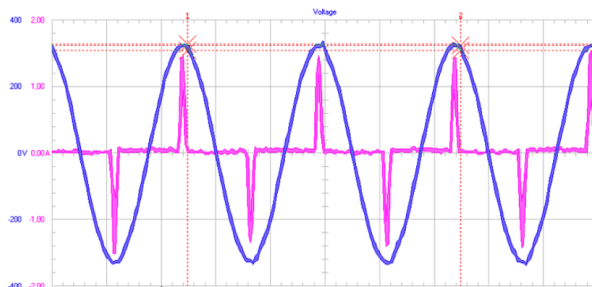
4.1.1 Bærbare datamaskiner

Det ble utført målinger på fem ulike bærbare datamaskiner med tilhørende strømforsyningsenhet. Vedlegg C gir en komplett oversikt over overharmonisk spektrum, samt strøm- og spenningskurve for hvert testobjekt, mens de viktigste resultatene blir presentert i dette underkapitlet. En oversikt over måleresultatene for hvert testobjekt er presentert i tabell 4.1. Resultatene i tabell 4.1 tyder på at fire av de fem testobjektene har en total harmonisk forvrengning (THDi [%f]) av tilførselstrømmen på 185-234 %. Testobjekt PC 3 har derimot en særdeles lav total harmonisk forvrengning på 16,6 %. Resultatene viser også at 3. harmoniske er den harmoniske med høyest verdi.

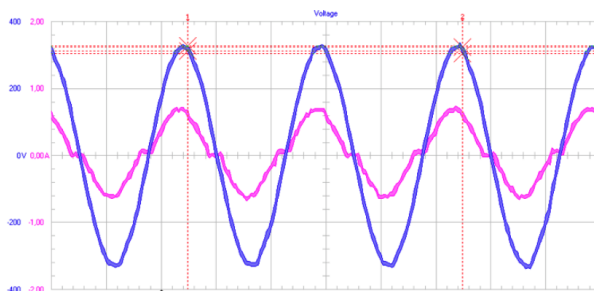
Tabell 4.1: Måleresultater overharmoniske strømmer fra ulike bærbare datamaskiner.

Test ID	I_{rms} [A]	I_{fund} [A]	THDi [%f]	3. h [%f]	5. h [%f]	7. h [%f]	9. h [%f]
PC 1	0,28	0,10	234,4	98,2	92,4	91,1	84,7
PC 2	0,40	0,18	191,7	96,1	87,4	76,8	64,6
PC 3	0,42	0,41	16,6	14,8	4,5	4,4	2,5
PC 4	0,28	0,12	194,2	91	88,4	79,1	73,2
PC 5	0,47	0,27	185,4	94,1	85,5	76	62

Figurene 4.1 og 4.2 viser forskjellene i kurveformen til tilførselstrømmen for datamaskinene med henholdsvis høyest (PC 1) og lavest (PC 3) total harmonisk forvrengning.



Figur 4.1: Strøm- og spenningskurve PC 1.



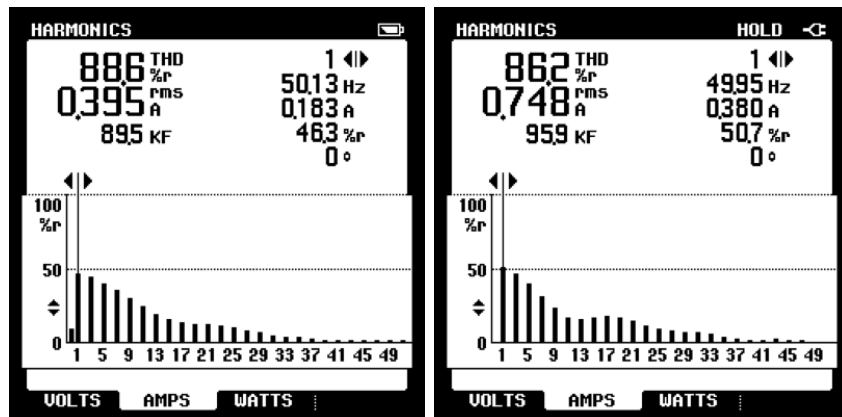
Figur 4.2: Strøm- og spenningskurve PC 3.

Videre ble det utført målinger på bruk av flere identiske datamaskiner samtidig. Dette ble gjort for å undersøke eventuelle endringer i den overharmoniske forvrengningen av tilførselstrømmen når flere datamaskiner er samlet på samme kurs. Tabell 4.2 viser måleresultatene med et varierende antall av PC 2 i bruk.

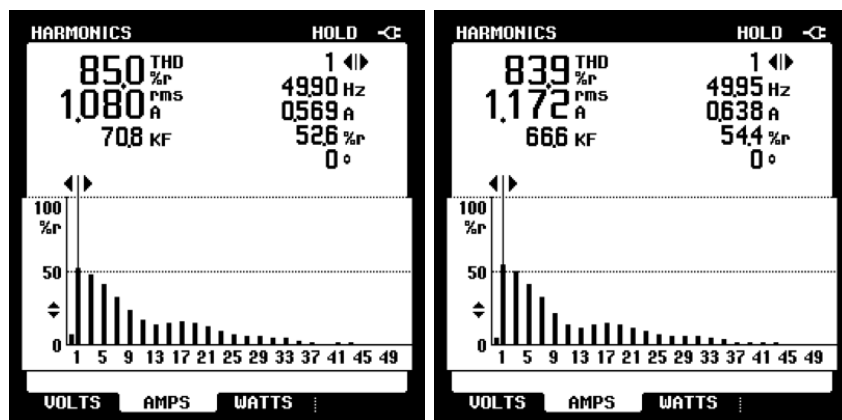
Tabell 4.2: Måleresultater overharmoniske strømmer 1-4 stk. PC 2.

Test ID	I_{rms} [A]	I_{fund} [A]	THDi [%rms]	THDi [%f]	3. h [%rms]	3. h [%f]
1 stk. PC 2	0,40	0,18	88,6	191,7	44,2	96,1
2 stk. PC 2	0,75	0,38	86,2	170,6	46,4	91,4
3 stk. PC 2	1,08	0,57	85	162,2	48,1	91,3
4 stk. PC 2	1,17	0,64	83,9	153,2	49,5	91

Figur 4.3 på neste side viser hvordan det overharmoniske spektrumet endrer seg med antallet datamaskiner. Resultatene viser en klar trend til at den totale harmoniske forvrengningen minker med økende andel datamaskiner tilkoblet. Av figuren fremkommer det også tydelig at de 3. harmoniske strømmene blir mer dominante i forhold til de andre overharmoniske med et økende antall datamaskiner.



(a) Overharmonisk spektrum én (b) Overharmonisk spektrum to stk. PC 2.



(c) Overharmonisk spektrum tre (d) Overharmonisk spektrum fire stk. PC 2.

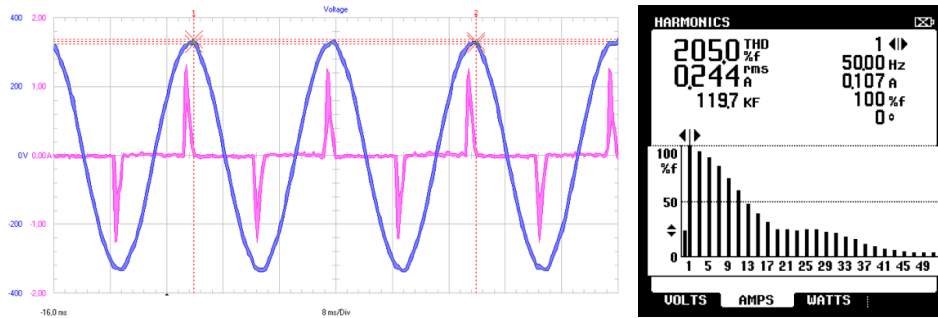
Figure 4.3: Overharmonisk spektrum [%rms] 1-4 stk. PC 2.

4.1.2 PC-monitorer

Det ble også utført målinger på fire ulike PC-monitorer med tilhørende strømforsyningsenhet. Vedlegg D gir en komplett oversikt over overharmonisk spektrum, samt strøm- og spenningskurve for hvert testobjekt. Kun de viktigste resultatene blir presentert i dette underkapittelet. Tabell 4.3 viser en oversikt over de viktigste måledataene. Da strømforsyningsenheten til monitorene er SMPS (se teori s. 14) tilføres strømmen som pulsstrøm. Dette gir en THDi [%f] på 144,6-205 % for utvalget av monitorer. Resultatene viser også svært høye 3. harmoniske strømkomponenter for alle monitorene.

Tabell 4.3: Måleresultater overharmoniske strømmer fra ulike PC-monitorer.

Test ID	I_{rms} [A]	I_{fund} [A]	THDi [%f]	3. h [%f]	5. h [%f]	7. h [%f]	9. h [%f]
PC mon 1	0,122	0,068	149,7	87,3	78,6	68,9	50,5
PC mon 2	0,244	0,107	205	95,8	89,2	81	70,2
PC mon 3	0,118	0,061	165,3	93,3	81,5	67,6	52,2
PC mon 4	0,169	0,096	144,6	93	78,7	60	38,9



Figur 4.4: Strøm-, spenningskurve og overharmonisk spektrum PC mon 1.

4.1.3 Lyskilder

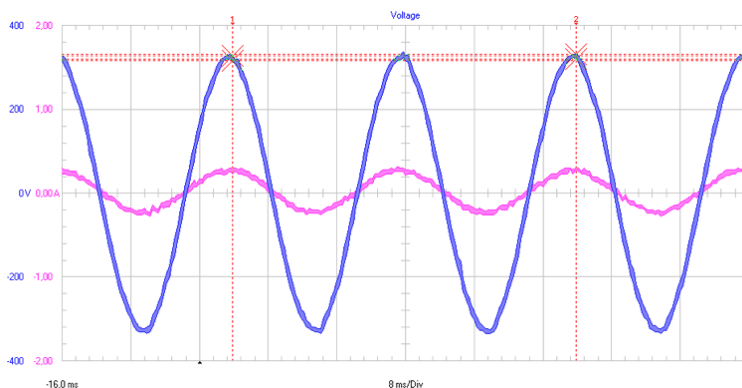
I dette kapitlet blir en oversikt over noen av de viktigste resultatene presentert. Vedlegg B gir en komplett oversikt over overharmonisk spektrum, samt strøm- og spenningskurve for hvert testobjekt.

Referanselyskilde

Det ble utført målinger på en halogenlampe som skulle fungere som referanselyskilde. Disse lampene anses som lineære laster og skal i teorien ikke inneholde overharmoniske strømkomponenter. Målingene ble utført for å vise forskjellen mellom lineære laster og ulineære laster med hensyn på generering av overharmoniske strømmer. Resultatene i tabell 4.4 viser at referanselyskilden inneholder neglisjerbare overharmoniske strømmer, og figur 4.5 viser at halogenlampen trekker en tilnærmet sinusformet strøm.

Tabell 4.4: Måleresultat referanselyskilde.

Test ID	I_{rms} [A]	I_{fund} [A]	THDi [%f]	3. h [%f]	5. h [%f]	7. h [%f]
HALO E27 1	0,18	0,18	1	0,2	0,1	0,1



Figur 4.5: Strøm- og spenningskurve HALO E7 1.

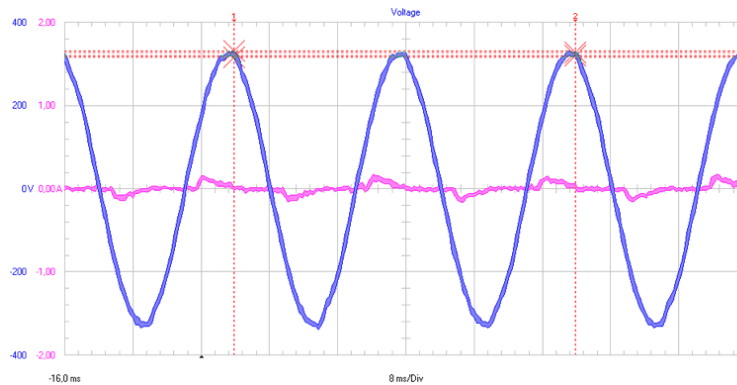
LED-lamper E27- og E14-sokkel

Måleresultatene av overharmoniske strømmer fra LED-lamper med E27- og E14-sokkel er samlet i tabell 4.5. Resultatene viser svært varierende resultater mellom de ulike lyskildene. Den høyeste THDi-verdien er 84,7 %, mens den laveste er kun 9,2 %. Den høyeste 3. harmoniske ble målt til 69,9 % av den grunnharmoniske, mens den laveste ble målt til 4,8 %.

Tabell 4.5: Måleresultater overharmoniske strømmer fra LED-lamper med E27- og E14-sokkel.

Test ID	I_{rms} [A]	I_{fund} [A]	THDi [%f]	3. h [%f]	5. h [%f]	7. h [%f]	9. h [%f]
LED E27 1	0,042	0,042	11,6	9,6	0,5	0,5	0,5
LED E27 2	0,042	0,042	11,5	8,5	0,5	0,5	0,5
LED E27 3	0,024	0,023	9,2	4,8	1	1	2,8
LED E27 4	0,050	0,044	55	22,2	16,7	26,6	17,8
LED E27 5	0,054	0,045	65,2	55,4	19,8	17,1	11,9
LED E14 1	0,029	0,023	78,3	63,7	34	22	20,8
LED E14 2	0,031	0,024	84,7	69,9	35,8	20,2	15,7

Figur 4.6 viser strømkurven til en av LED-lampene med høyest THDi og 3. harmoniske.



Figur 4.6: Strøm- og spenningskurve LED E27 5.

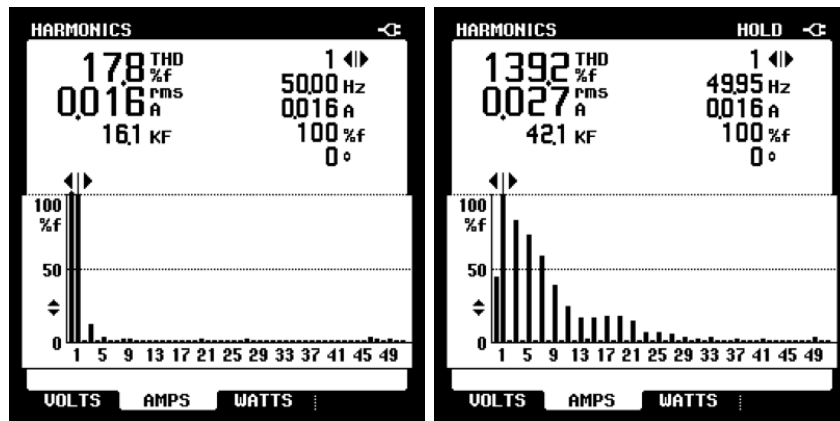
LED-spot GU10-sokkel

Måleresultatene av overharmoniske strømmer fra LED GU10 spotter er samlet i tabell 4.6. Resultatene viser også for disse lyskildene en svært varierende generering av overharmoniske strømmer på tvers av de ulike lyskildene. Måleresultatene viser at den høyeste THDi-verdien er 139,2 %, mens den laveste er 17,8 %. Også for LED-spottene er 3. harmoniske den mest dominante. Den høyeste målte 3. harmoniske verdien ble målt til 81,9 % av den grunnharmoniske, mens den laveste var 10,8 %.

Tabell 4.6: Måleresultater overharmoniske strømmer fra LED GU10 spot.

Test ID	I_{rms} [A]	I_{fund} [A]	THDi [%f]	3. h [%f]	5. h [%f]	7. h [%f]	9. h [%f]
LED GU10 1	0,014	0,013	25	19,3	5,5	3,7	1,9
LED GU10 2	0,016	0,016	17,8	10,8	2,8	1,4	2,9
LED GU10 3	0,031	0,025	66,5	55	21,3	15,9	15
LED GU10 4	0,035	0,024	102,2	75,9	43,9	25,5	19,6
LED GU10 5	0,027	0,016	139,2	81,9	73,6	58,3	38,9

Figur 4.7 viser forskjellene i overharmonisk spektrum for LED-spotten med lavest og høyest THDi-verdi.



(a) LED GU10 2.

(b) LED GU10 5.

Figur 4.7: Overharmonisk spektrum for LED GU10 spotter med lavest og høyest THDi.

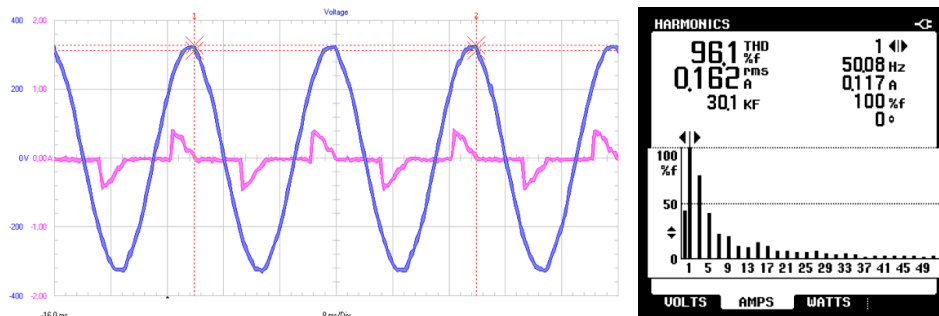
Sparelamper E27- og E14-sokkel

Tabell 4.7 gir måleresultatene for sparelamper med E27- og E14-sokkel. Resultatene i tabellen viser at de utvalgte sparelampene har svært høye verdier av THDi og 3. harmoniske.

Tabell 4.7: Måleresultater overharmoniske strømmen fra sparelamper med E27- og E14-sokkel.

Test ID	I_{rms} [A]	I_{fund} [A]	THDi [%f]	3. h [%f]	5. h [%f]	7. h [%f]	9. h [%f]
CFL E27 1	0,162	0,117	96,1	74,9	41,2	23,5	19,8
CFL E27 2	0,074	0,055	88,9	69,1	31,3	20,5	17,7
CFL E14 1	0,038	0,030	81,1	66,9	28,3	21,5	16,3
CFL E14 2	0,038	0,028	93,4	76,6	38,7	22,6	18,5

Figur 4.8 viser det overharmoniske spektrumet til sparelampen med høyest verdi av THDi. Figuren viser at sparelampen har svært fremtredende verdier av odde harmoniske, da spesielt 3. harmoniske. Figuren viser også en strømkurve som er rik på overharmoniske strømmen.



Figur 4.8: Strøm-, spenningskurve og overharmonisk spektrum CFL E27 1.

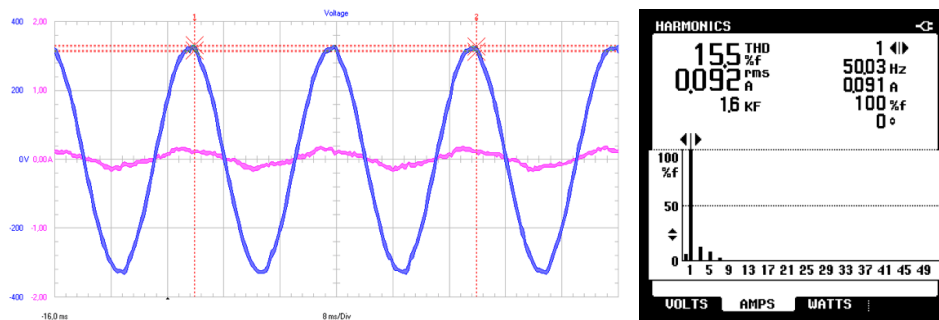
LED- og fluorescerende lysrør

Måleresultatene av overharmoniske strømmer fra lysrørene er samlet i tabell 4.8. Resultatene viser at tre av de fire LED-lysrørene har en høyere THDi enn T8- og T5 fluorescerende lysrør. To av LED-lysrørene har høyere andel 5. harmoniske enn 3. harmoniske strømmer, mens for resten av lysrørene er 3. harmoniske mest dominant.

Tabell 4.8: Måleresultater overharmoniske strømmer fra LED- og fluorescerende lysrør.

Test ID	I_{rms} [A]	I_{fund} [A]	THDi [%f]	3. h [%f]	5. h [%f]	7. h [%f]	9. h [%f]
LED ST8 1	0,092	0,091	15,5	11,6	8,4	3,5	0,7
LED ST8 2	0,093	0,093	7,3	5,5	3,6	1,9	1,2
LED ST8 3	0,105	0,104	16,1	9	11,3	6,2	2,1
LED ST8 4	0,083	0,082	15,6	7,9	11,7	5,7	1,9
FL T8 1	0,391	0,390	7,9	7,3	1,8	1,4	0,5
FL T5 1	0,274	0,274	5,5	3,6	2,4	0,6	1,8

Figur 4.9 viser strøm- og spenningskurve og overharmonisk spektrum til LED-lysrøret med høyest 3. harmoniske verdier.



Figur 4.9: Strøm-, spenningskurve og overharmonisk spektrum LED ST8 1.

4.2 Resultater av målinger på anlegg

4.2.1 Elektrobygget, NTNU Gløshaugen

Det ble utført målinger på Elektrobygget for å kartlegge overharmoniske strømmer og spenninger i større installasjoner. Som nevnt i kapittel 3 ble det utført målinger på stigekabler, samt enkeltkurser til belysningsutstyr og stikkontakter. Videre i dette underkapittelet blir de viktigste måleresultatene av overharmoniske strømmer og spenninger presentert.

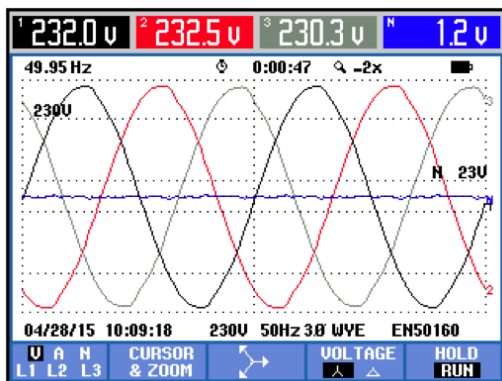
Stigekabler

De to stigekablene det ble utført målinger på i Elektrobygget forsyner teknisk utstyr og lys i etasjen. Typiske strømverdier for stigekablene er presentert i tabell 4.9. Strømverdiene er ikke konstante verdier, men endrer seg kontinuerlig over måleperioden og er derfor presentert i intervaller. I vedlegg E er strøm- og spenningskurver for alle faselederne, overharmonisk spektrum, samt overharmoniske tabeller presentert for begge stigekablene.

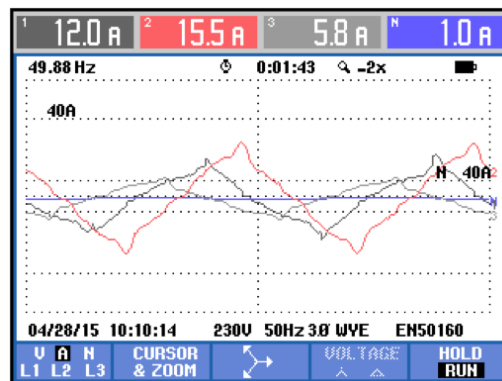
Tabell 4.9: Måleresultater strømverdier i stigekabler, Elektrobygget.

Målepunkt	Vern [A]	I_{rms} L1, L2, L3 [A]	I_{rms} N-leder [A]	THDi [%f]	3. h [%f]
Stigekabel underfordeling 3. etg. E-blokk	125	5,8-15,5	1,0-1,2	11,4-20,7	10,8-15,8
Stigekabel underfordeling 3. etg. F-blokk	125	5,0-13,8	0,8-0,9	15,8-27,4	10,7-21

Figur 4.10a og 4.10b viser henholdsvis spenning- og strømkurve til stigekabelen i 3. etg. E-blokk. Figuren viser tilnærmet sinusformet spenningskurve med spenningsverdier mellom 230,3 til 232,5 V i faselederne. Figur 4.10b viser fasestrømmer i stigekabelen med store andeler overharmoniske strømmer, og figur 4.10c viser overharmoniske strømverdier i tabellform for den samme stigekabelen.



(a) Spenningskurver.



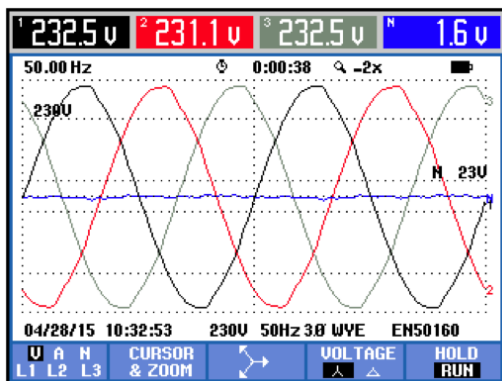
(b) Strømkurver.

HARMONICS TABLE				
Amp	L1	L2	L3	N
THD%f	20.7	15.4	18.7	44.3
H3%f	15.8	10.8	12.7	39.2
H5%f	6.9	5.8	6.7	5.9
H7%f	8.0	6.3	7.4	6.1
H9%f	5.8	4.9	6.4	16.8
H11%f	3.1	3.4	2.9	3.9
H13%f	2.6	2.4	4.0	2.2
H15%f	1.7	1.7	2.3	5.6

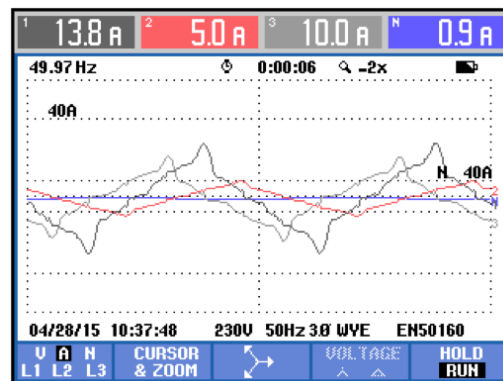
(c) Overharmonisk tabell, strøm.

Figur 4.10: Målinger stige-kabel 3. etg. E-blokk.

Figur 4.11a og 4.11b på neste side viser spenning- og strømkurve til stige-kabelen i 3. etg. F-blokk. Også spenningen i denne underfordelingen viser tilnærmet sinusformet spenningskurve. Som stige-kabelen i E-blokken, har også denne stige-kabelen fasestrømmer med høye andeler overharmoniske strømmer. En oversikt over overharmoniske strømmer er gitt i tabellform i figur 4.11c.



(a) Spenningskurver.



(b) Strømkurver.

HARMONICS TABLE				
Amp	L1	L2	L3	N
THD%f	25.3	16.3	27.2	77.9
H3%f	17.4	12.2	20.4	67.4
H5%f	10.7	5.5	9.4	21.9
H7%f	10.7	7.2	9.4	7.8
H9%f	7.5	3.8	8.6	26.5
H11%f	4.3	2.7	5.7	12.2
H13%f	3.9	1.8	4.7	0.9
H15%f	1.7	1.0	3.7	8.0

(c) Overharmonisk tabell, strøm.

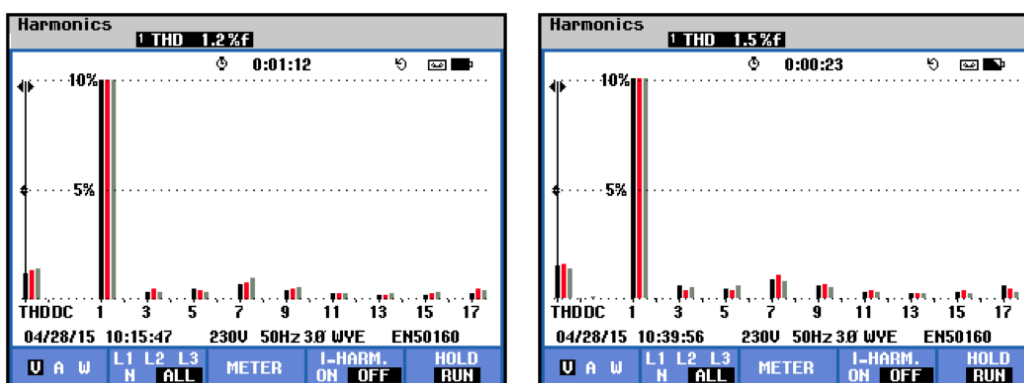
Figur 4.11: Målinger stige-kabel 3. etg. F-blokk.

Overharmoniske verdier i spenningen mellom fase og nøytral i underfordelingene er presentert i tabell 4.10. Resultatene viser en lav total harmonisk forvrengning av spenningskurvene, der 1,5 % den høyest målte verdien. Resultatene viser at de 7. harmoniske er av høyest verdi for begge underfordelingene.

Tabell 4.10: Måleresultater overharmoniske spenninger i underfordelinger, Elektrobygget.

Målepunkt	THDu [%f] Fase-N	3.h [%f] Fase-N	5.h [%f] Fase-N	7.h [%f] Fase-N
Stigekabel Underfordeling 3. etg. E-blokk	1,2-1,4	0,3-0,5	0,3-0,5	0,7-1,0
Stigekabel Underfordeling 3. etg. F-blokk	1,3-1,5	0,3-0,6	0,3-0,7	0,7-1,1

Figur 4.12 viser spenningens overharmoniske spektrum i stigekabel 3. etg. E-blokk og F-blokk.



(a) Overharmonisk spektrum E-blokk. (b) Overharmonisk spektrum F-blokk.

Figur 4.12: Overharmonisk spektrum spenning, stigekabel underfordeling 3. etg. E- og F-blokk.

Kurskabler

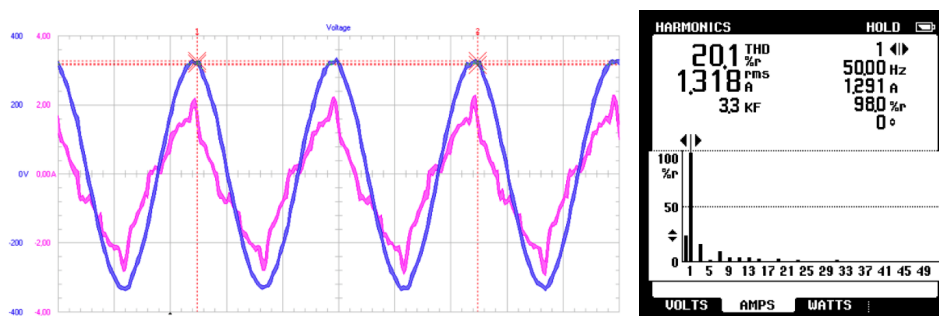
De viktigste måleresultatene på enkeltkurser til lys og stikk, forsynt fra underfordelingen i E-blokken, er samlet i tabell 4.11. Vedlegg ?? gir overharmonisk spektrum, strøm- og spenningskurve, samt overharmoniske strømverdier for hver enkelt kurs. Avhengig av størrelsen på kontoret består belysningen i kontorene av én til tre nedhengte LED-armaturer. Lyskurs F80 forsyner for det meste lysrørarmatur med elektronisk forkobling i servicelaben, men det er også noen få LED-armaturer på denne kursen. Lyskurs F82 forsyner syv kontorer og et møterom med LED-armaturer, samt lyslaben som består av 15

lysrørarmatur med elektronisk forkobling. Lyskursene F81 og F83 forsyner LED-downlights i korridorer, samt LED-armaturer på kontorer. Måleresultatene i tabellen under viser relativt lave THDi-verdier for tre av fire lyskurser. Kursene til stikkontakter viser imidlertid svært høye THDi-verdier, samt 3. harmoniske strømmer.

Tabell 4.11: Måleresultater strømverdier i kurskabler E-blokk.

Kurs nr.	Kursbeskrivelse	Vern [A]	I_{rms} [A]	THDi [%f]	3.h [%rms]
F81	Lys korridor vest og kontorer E351-367	10	4,1	7,8	4,6
F83	Lys korridor øst og kontorer E318+322	10	5,5	7,1	4,8
F80	Lys servicelab E352-364	16	4,6	8,7	7,3
F82	Lys kontorer, lyslab E317-328	10	1,3	20,4	15,7
F41	Stikk kontorer	16	0,4	75	24,3
F43	Stikk kontorer	16	1,4	18,8	10,4
F72	Stikk lyslab	16	0,7	165,7	46

Figur 4.13 viser overharmonisk spektrum og strømkurven til lyskurs F82. Av resultatene fremkommer det at dette var lyskursen med høyest THDi-verdi, samt 3. harmoniske strømmer.



Figur 4.13: Strøm-, spenningskurve og overharmonisk spektrum kurs F82.

4.2.2 Brattørkaia 15, Trondheim

I dette underkapittelet presenteres de viktigste måleresultatene på stige kabler og kurser i kontorbygget Brattørkaia 15.

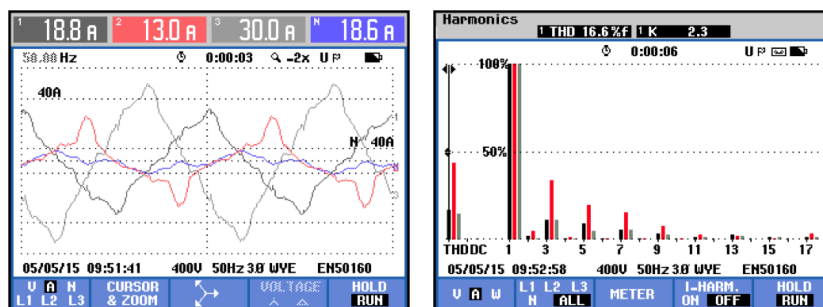
Stigekabler

Tabell 4.12 viser strømverdier i åtte ulike stige kabler som forsyner underfordelinger til teknisk og lys i Brattørkaia 15.

Tabell 4.12: Måleresultater strømverdier i stige kabler til underfordelinger som forsyner teknisk og lys, Brattørkaia 15.

Målepunkt	Vern [A]	I_{rms} L1, L2, L3 [A]	I_{rms} N-leder [A]	THDi [%f]	3. h [%f]
XQ101	100	16,7-48,4	27,4-27,5	10,9-28,5	4,1-8,5
XQ102	100	15,5-23,4	12,5-12,7	19,1-29,3	14,3-22,2
XQ104	125	27,7-31,5	12,4-13,8	14,8-17,4	11,1-14
XQ105	100	7,6-12,9	10,9-11,1	18,2-36,6	13,3-27,8
XQ106	160	9,4-25,2	13,6-16,6	2,1-6,5	1,4-5,0
XQ107	100	13-30	14,9-18,8	14,6-44,2	10,7-34
XQ108	125	9,1-15,4	8,0-8,2	16,8-28	11,4-24,5
XQ109	125	6,4-14	9,6-9,8	25,7-37,5	19,4-26,9

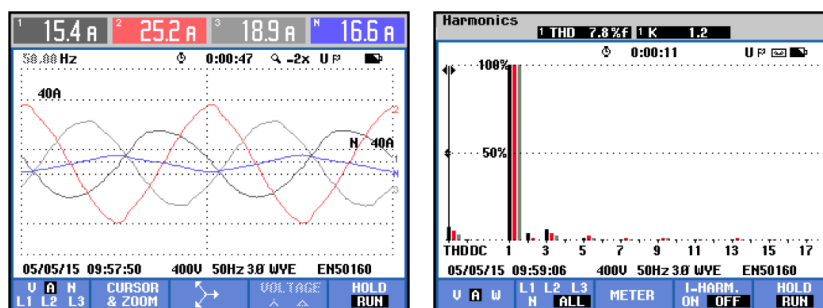
Figurene 4.14a og 4.14b viser henholdsvis strømkurver og overharmonisk spektrum til faselederne i stige kabel XQ107. Dette var stige kabelen med høyest målte THDi-verdi. Faseleder L2 hadde en total harmonisk forvrengning av fasestrømmen på 44,2 % av den grunnharmoniske og 3. harmoniske strømmer på 34 % av den grunnharmoniske. Av figur F.6c fremkommer det at faseleder L2 har over dobbelt så høye 3. harmoniske verdier som de to andre faselederne i stige kabelen.



(a) Strømkurver L1, L2, L3 og (b) Overharmonisk spektrum N-leder. L1, L2 og L3, strøm.

Figur 4.14: Måleresultater stige-kabel XQ107, Brattørkaia 15.

Som det fremkommer av figur 4.15 hadde en av stige-kablene svært lave overharmoniske verdier sammenlignet med de andre stige-kablene i installasjonen. Kurs XQ106 hadde THDi-verdier mellom 2,1-6,5 % av den grunnharmoniske og 3. harmoniske strømmer mellom 1,4-5,0 % av den grunnharmoniske. Disse lave verdiene skyldes de tilnærmet sinusformede fasestrømmene i kabelen (figur 4.15a).



(a) Strømkurver L1, L2, L3 og (b) Overharmonisk spektrum N-leder. L1, L2 og L3, strøm.

Figur 4.15: Måleresultater stige-kabel XQ106, Brattørkaia 15.

Kurskabler

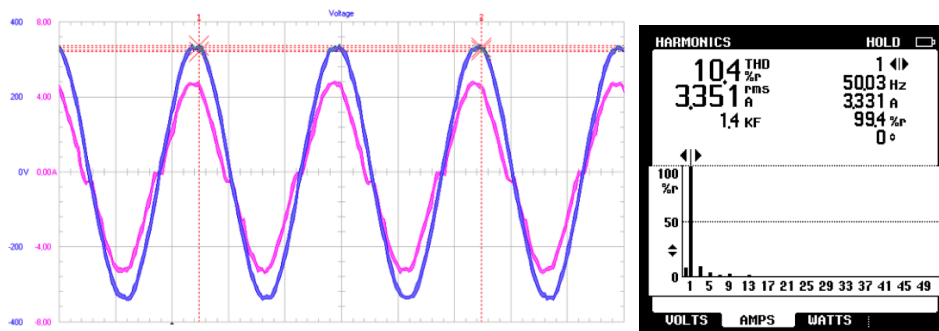
Måleresultatene på enkeltkursener fra en av underfordelingene i 1. etg. er samlet i tabell 4.13. Spenningsmålingene viste lave THDu-verdier på 0,8-1,0 % for kursene og er dermed ikke tatt med i dette underkapittelet. Som tabellen viser ble det foretatt strømmålinger på fire ulike kursener. To av kursene (XF210

og XF211) forsyner LED-armaturer i glassgården. Kurs XF113 forsyner stikkontakter på kontorer og i et møterom, mens kurs XF201 går til et kontor med lysrørarmatur med elektronisk forkobling.

Tabell 4.13: Måleresultater strømverdier i kurskabler, Brattørkaia 15.

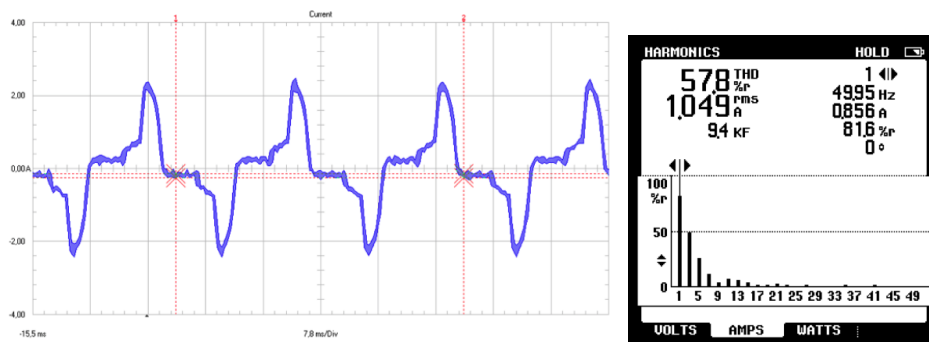
Målepunkt	Vern [A]	I_{rms} [A]	THDi [%f]	3. h [%rms]
XF201 Lys kontor	16	1,9	8,4	7,2
XF210 Lys Glassgård tak, søyler	16	3,4	10,1	9,0
XF211 Lys Glassgård rundt glassgård	16	5,3	9,7	5,7
XF113 Stikk kontor, møterom	16	1,0	71,7	48,7

Figur 4.16 viser strømkurve og overharmonisk spektrum til lyskursen med høyest THDi-verdi og 3. harmonisk strøm.



Figur 4.16: Strøm-, spenningskurve og overharmonisk spektrum lyskurs XF210.

Den høyeste THDi-verdien, samt 3. harmoniske strømmer ble målt på kursen som forsyner stikkontakter på kontoret og i møterommet. Av både måleresultatene og kurveformen til strømmen (figur 4.17) fremkommer det tydelig at datautstyr er tilkoblet stikkontaktene, siden strømmen i kurskabelen trekkes som pulsstrømmer.



Figur 4.17: Strøm-, spenningskurve og overharmonisk spektrum stikkontaktkurs XF113.

4.2.3 P15-bygget, NTNU Gløshaugen

I dette underkapittelet presenteres de viktigste måleresultatene på stigekabelen og enkeltkurser som forsyner teknisk og lys i etasjen med fire store datasaler.

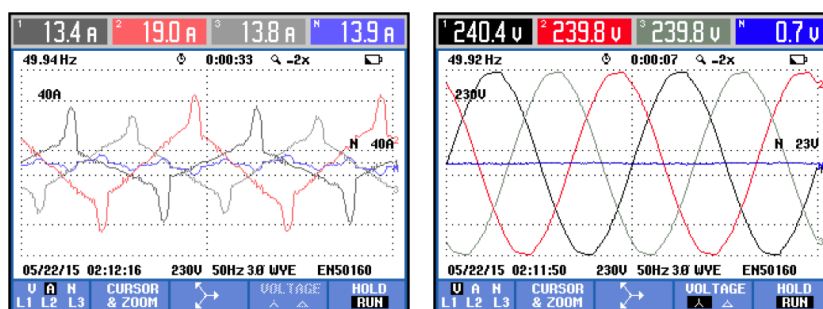
Stigekabel

Måleresultatene av strømverdiene i stigekabelen som forsyner 4. etg. i P15-bygget er presentert i tabell 4.14. Strømverdiene i stigekabelen er presentert i intervaller da de er ulike for hver faseleder og endrer seg kontinuerlig over måleperioden. Resultatene viser betydelige verdier av total harmonisk forvrengning av fasestrømmene, samt 3. harmoniske strømmer i faselederne.

Tabell 4.14: Måleresultater strømverdier i stigekabel, P15-bygget.

Målepunkt	Vern [A]	I_{rms} L1,L2,L3 [A]	I_{rms} N-leder [A]	THDi L1,L2,L3 [%f]	3. h L1,L2,L3 [%f]
Stigekabel Underford. +F4.100	125	13,2-19,1	13,7-13,9	30,3-58,3	20,3-37,3

Figur 4.18 viser strøm- og spenningskurvene til stigekabelen som forsyner teknisk og lys i 4. etg. i P15-bygget. Av målingene fremkommer det at strømkurvene er svært forvrengte, mens spenningskurvene er nærmest sinusformet.



(a) Strømkurver stigekabel P15- bygget. (b) Spenningskurver stigekabel P15-bygget.

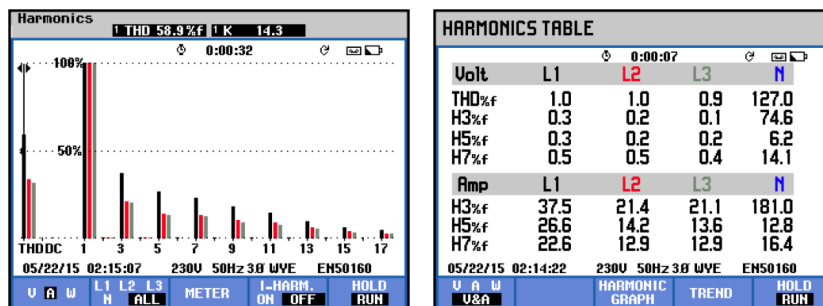
Figur 4.18: Strøm- og spenningskurver stigekabel P15-bygget.

Tabell 4.15 viser målte verdier av overharmoniske spenninger. Resultatene viser svært lav total harmonisk forvrengning av fasespenningene, der THDu lik 1,0 % er den høyest målte verdien i underfordelingen.

Tabell 4.15: Måleresultater overharmoniske spenninger i stigekabelen, P15-bygget.

Målepunkt	THDu [%f] Fase-N	3.h [%f] Fase-N	5.h [%f] Fase-N	7.h [%f] Fase-N
Stigekabel underfordeling +F4.100	0,8-1,0	0,1-0,3	0,2-0,3	0,4-0,5

Videre viser figur 4.19 overharmonisk spektrum til fasestrømmene, samt harmoniske strøm- og spenningsverdier. De overharmoniske verdiene i figur 4.19b viser svært liten grad av harmonisk forvrengning av fasespenningene. Figur 4.19a viser betydelig tilstedeværelse av 3., 5., og 7. harmoniske strømmer i faselederne, der 3. harmoniske er mest dominant.



(a) Harmonisk spektrum stigekabel P15-bygget. (b) Harmonisk tabell stigekabel P15-bygget.

HARMONICS TABLE				
Amp	L1	L2	L3	N
THD%f	58.3	32.5	30.3	203.7
H3%f	36.8	20.8	20.3	178.5
H5%f	26.6	13.7	12.8	13.4
H7%f	23.1	12.8	12.4	17.4
H9%f	18.8	10.2	8.5	85.3
H11%f	15.1	8.7	7.3	12.0
H13%f	10.5	6.6	5.4	9.6
H15%f	6.4	4.1	3.4	31.8

(c) Overharmonisk tabell, strøm.

Figur 4.19: Harmoniske i stigekabel, P15-bygget.

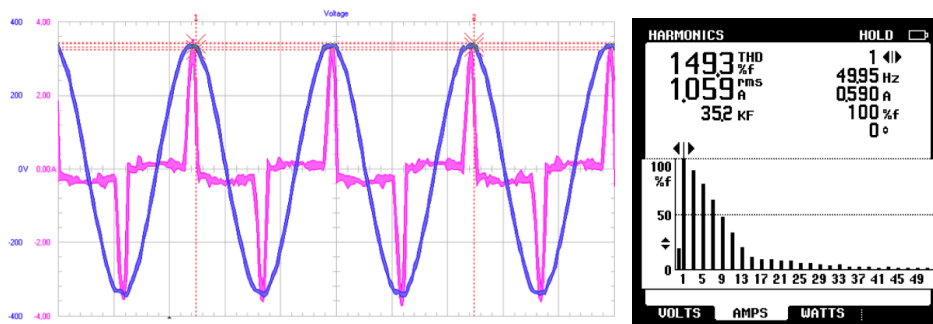
Kurskabel

Måleresultatene av et utvalg kurser i 4. etg. i P15-bygget er samlet i tabell 4.16. Tre av kursene forsyner stikkontakter i datasalene der stasjonære datamaskiner og PC-monitorer er tilkoblet. Det ble også utført én måling på lyskursen som forsyner lysarmaturene i datasalene. Måleresultatene på stikkontaktkursene viser svært høye THDi-verdier, samt høye andeler 3. harmoniske strømmer i kurskablene. Lyskursen viser imidlertid lave overharmoniske verdier. Den totale harmoniske forvrengningen av spenningen var svært liten for alle kursene med THDu [%f] mellom 0,8-1,0 %.

Tabell 4.16: Måleresultater strømverdier kurskabler, P15-bygget.

Kurs	Vern [A]	I_{rms} [A]	THDi [%f]	3. h [%rms]
XQ306 Stikk datasal	16	1,3	115	51
XQ307 Stikk datasal	16	1,0	126	52
XQ309 Stikk datasal	16	1,1	149	50
XQ020 Lyskurs datasaler	16	6,8	10	8,3

Figur 4.20 viser strømkurve og overharmonisk spektrum til stikkontaktkursen med høyest THDi og 3. harmoniske strømmer. Av målingene fremkommer det at tilførselstrømmen til datamaskinene er svært forvrengt. Resultatene viser pulsstrømmer som er typisk tilførselstrøm til datautstyr.



Figur 4.20: Strøm-, spenningskurve og overharmonisk spektrum kurs XQ309.

Kapittel 5

Diskusjon

I dette kapitlet drøftes og diskuteres valg av metode, samt måleresultater av laboratorieforsøk og målinger på anlegg. I tillegg vil forslag til videre arbeid presenteres i slutten av dette kapitlet.

5.1 Diskusjon av metode

Målemetoden benyttet i laboratorieforsøkene gav sammenlignbare resultater mellom de ulike testobjektene, og det er grunn til å tro at verdiene for hvert enkelt testobjekt er pålitelig siden alle målinger ble foretatt to ganger. Utvalget av ulike datamaskiner og monitører som det ble utført målinger på, anses som tilfredsstillende og representativt for hva som kan være i bruk i typiske yrkesbygg. Måleapparatet Fluke 43 og strømtangen som ble benyttet skal være nøyaktig for måling av små strømmer, og det er dermed grunn til å tro at de målte strømverdiene for hvert testobjekt er gyldige. Målingene på de bærbare datamaskinene hadde imidlertid en usikkerhetskilde ved at målingene ble utført under lading når datamaskinene var ca. 50 % fulladet. Det kan være forskjeller i ladekarakteristikker for de ulike datamaskinene, som videre kan ha innvirkning på strømforsyningen til datamaskinene.

Utvalget av lyskilder anses, for de aller fleste sokkeltypene, som tilfredsstillende. Det ble imidlertid kun utført tester på to ulike LED E14 lamper, og begge var fra samme leverandør. Aller helst skulle også LED E14 lamper fra Osram og/eller Philips vært testet, siden dette er de mest seriøse aktørene på belysningsmarkedet. For de resterende lyskildene anses både antall og variasjon i testede merkevarer (Philips, Osram, Megaman og Ikea) som god. Samlet sett

anses benyttet måleoppsettet, måleinstrument, samt utvalget av testobjekter som god for å kartlegge hvilke overharmoniske strømmer potensielle ”støykilder” genererer. Måleverdiene gir tilgang til informasjon om karakteristikk og funksjoner til enkeltkomponenter, som videre kan ha overføringsverdi til prosjekterende av elektriske installasjoner.

Antallet installasjoner som det ble utført målinger på skulle aller helst vært større. Dermed kunne måledataene på installasjoner i denne rapporten vært mer generaliserende. I tillegg skulle strøm- og spenningsmålinger på stigekabler og kurskabler aller helst blitt logget over lengre perioder, gjerne en hel uke, for å øke reliabiliteten til målingene. Tilgjengeligheten på måleutstyr gjorde dessverre sistnevnte umulig å gjennomføre. Likevel er det grunn til å tro at måledataene kan gi innblikk i hva som kan forventes av overharmoniske strømmer og spenninger i stige- og kurskabler i yrkesbygg. Deler av måledataene kan dermed ha en overføringsverdi til prosjekterende av elektriske installasjoner i yrkesbygg.

5.2 Laboratorieforsøk

5.2.1 Bærbare datamaskiner

Av resultatene (ref. tabell 4.1, s. 48) er det tydelig at bærbare datamaskiner med tilhørende strømforsyningsenhet, kan være en stor bidragsyter til overharmoniske strømmer og spenninger i elektriske installasjoner. Resultatene viser at fire av de fem datamaskinene har svært like og høye verdier av overharmoniske strømmer, med THDi mellom 185-234 % av den grunnharmoniske strømmen. Som forventet var det harmoniske innholdet i strømkurven dominert av odde harmoniske, mens innholdet av like harmoniske (2. h, 4. h, osv.) var neglisjerbar. Som beskrevet i teorikapittelet på side 14, viser resultatene at amplituden til 3., 5. og 7. harmoniske kan bli høye i forhold til den grunnharmoniske. For fire av de fem datamaskinene var andelen 3. harmoniske mellom 90-100 % av den grunnharmoniske. Dette anses som svært høye verdier, og vil ved en høy tetthet av liknende lastkilder være dimensjonerende for valg av tverrsnitt på N-leder.

Strømkurvene (se vedlegg C) til tre av datamaskinene viser pulsstrømmer med svært spiss og høy amplitude. Dette samsvarer godt med forventet strømkaraktistikk til datautstyr som får strømforsyning gjennom enfasede diodelikerettere, presentert på side 14 i teorikapittelet. Det er grunn til å tro at en stor andel datamaskiner som trekker pulsstrømmer, kan være en

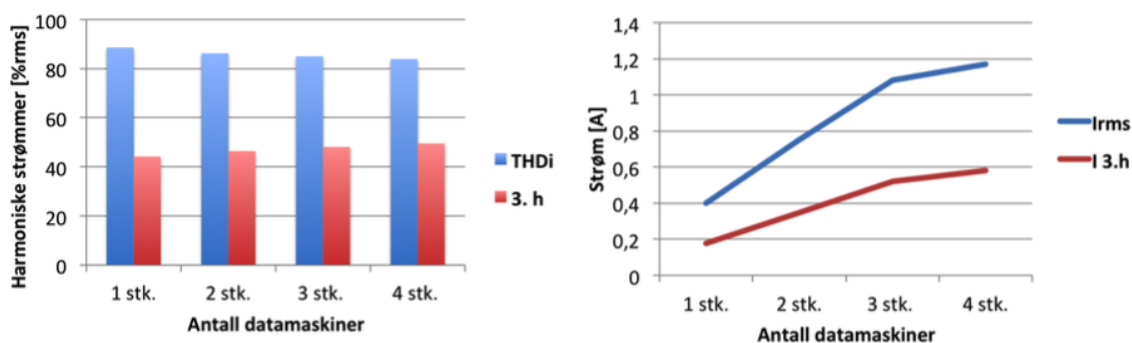
bidragsyter til forvrengning av spenningen. Siden spenningen er en funksjon av strømmen og systemimpedansen, kan spenningens kurveform bli påvirket i negativ forstand med pulserende strømtilførsel. Den høye strømapplituden kan skape forvrengning av spenningens kurveform ved å flate ut spenningens toppamplitude. Annet sensitivt utstyr som er avhengig av en tilnærmet sinusformet spenningskurve, kan få problemer med å fungere tilfredsstillende hvis spenningens toppamplitude blir flatet ut. Dette er derfor noe som bør tas i betraktning i installasjoner med høy tetthet av elektronisk utstyr med likerettere.

Resultatene viser at de bærbar datamaskinene trekker små strømmer ($I_{rms} \sim 0,28-0,48$ A og $I_{fund} \sim 0,10-0,40$ A). De overharmoniske strømmene fra hver datamaskin alene er dermed så lave at de ikke er i nærheten av å overgå maksimalt tillatt harmonisk strøm, gitt i NEK EN61000-3-2:2014 (ref. tabell 2.4, s. 27). Selv om den totale harmoniske forvrengningen til de fleste testede datamaskinene var særdeles høy, er det grunn til å tro at datamaskiner enkeltvis ikke kan skape problemer i en installasjon. Dette skyldes at datamaskinene individuelt sett har behov for svært liten strømtilførsel, og dermed utgjør en forsvinnende liten del i en stor elektrisk installasjon. Potensielle problemer i installasjoner vil mest sannsynlig først være gjeldende ved en høy tetthet av datamaskiner, eksempelvis i bygg med store datasaler.

En av datamaskinene skiller seg imidlertid ut med en liten andel overharmoniske strømmer. Testobjekt PC 3 er den datamaskinen med desidert lavest andel THDi med 16,6 %, som skyldes en tilnærmet sinusformet strømkurve (se figur 4.2, s. 48). Dette viser at generering av overharmoniske strømmer fra datautstyr kan varierer svært mye mellom ulike produkter og leverandører. Ved dimensjonering av elektriske installasjoner er det derfor en stor fordel å ha kjennskap til produktene som skal tilkobles installasjonen, slik at tiltak kan gjøres før eventuelle feil oppstår.

Videre ble det gjort målinger på bruk av én til fire identiske datamaskiner samtidig. Dette ble gjort for å betrakte eventuelle endringer i overharmoniske strømmer ved et større antall datamaskiner på samme kurs. Tidligere undersøkelser gjort på dette feltet har vist at et økende antall datalaster har en tendens til å dempe harmonisk generering [1]. Av artikkelen [1] fremkommer det at THDi og individuelle harmoniske verdier demper hverandre når antallet datalaster i parallell økes fra 5, 10 og 15. Samtidig er dempingen større for harmoniske av høyere orden, mens dempingen av 3. harmoniske er minimale. Resultatene i denne rapporten (ref. tabell 4.2, s. 49) viser at THDi [%rms] ble redusert fra 88,6 % til 83,9 % når antallet datamaskiner ble endret fra én til fire stykk. Til tross for at THDi reduseres, øker samtidig de 3. harmoniske

verdiene. Av måleresultatene fremkommer det at de 3. harmoniske strømmene øker med økende antall datamaskiner tilkoblet samme kurs, mens andre harmoniske enkeltkomponenter reduseres. Figur 5.1 viser at de 3. harmoniske strømmene øker fra ca. 0,2 A til 0,6 A, med et økende antall datamaskiner. I en installasjon med stikkontaktkurser til datautstyr vil dette være viktig å ta hensyn til. 3-fasekurser som forsyner et stort antall datamaskiner i f.eks. en datasal kan få betydelige 3. harmoniske strømmer i nøytrallederen, som følge av datautstyrets strøm karakteristikk.



Figur 5.1: Endring i overharmoniske verdier med økende antall datamaskiner.

5.2.2 PC-monitører

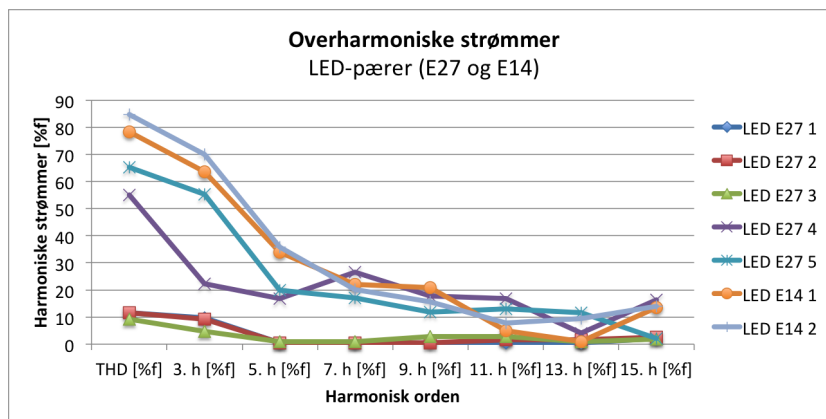
Måleresultatene (ref. tabell 4.3, s. 51) av PC-monitorene viser at også disse lastene kan generere betydelige andeler overharmoniske strømmer. Dette skyldes at også disse lastene får strømforsyning via en likeretter. Total harmonisk forvrengning med hensyn på den grunnharmoniske varierer mellom 144,6 til 205 %, som tilsvarer en svært høy total forvrengning. 3. harmoniske er som forventet den mest dominante overharmoniske, der det verste tilfellet har en 3. harmonisk andel på 95,8 % av den grunnharmoniske.

Samtidig er tilførselstrømmen til hver enkelt monitor veldig liten ($I_{rms} \approx 0,1-0,3$ A). De overharmoniske strømmene fra individuelle monitører er dermed så lave at de ikke er i nærheten av å overgå maksimalt tillatt harmonisk strøm, gitt i NEK EN61000-3-2:2014 (ref. tabell 2.4, s. 27). Monitorene utgjør individuelt sett en forsvinnende liten del, akkurat som individuelle datamaskiner, i en stor elektroinstallasjon. Det er derfor grunn til å tro at monitorene kun kan utgjøre skade i installasjoner ved en høy tetthet av monitører.

5.2.3 Lyskilder

LED E27- og E14-sokkel

Måleresultatene på ulike LED-lamper med E27- og E14-sokkel er samlet i figur 5.2 for å vise den varierende graden av overharmonisk generering på tvers av de ulike lyskildene.



Figur 5.2: Oversikt over måleresultater fra ulike LED-lamper med E27- og E14-sokkel.

Resultatene viser at graden av overharmonisk generering er sterkt avhengig av hvilken produsent lyskildene er laget av. LED-lampene med test-ID LED E27 1 til LED E27 3 hadde svært lave verdier av total harmonisk forvrengning, med THDi mellom 9,2-11,6 %. Disse tre lyskildene er produsert av Osram og det er tydelig at disse har en forkobling som begrenser generering av overharmonisk støy. Strømkurvene til disse tre LED-lampene (se vedlegg B) viser at forkoblingen i lampenes sokkel trekker tilnærmet sinusformet strøm, følgelig lave overharmoniske verdier.

De fire lyskildene med høyest THDi-verdi (mellom 55-84,7 %) er alle produkter levert av Megaman, som også er en seriøs aktør på belysningsmarkedet. Grunnen til de høye THDi-verdiene skyldes at disse lampene ikke har en forkobling som etterstreber å trekke sinusformet strøm. Strømkurvene til disse lyskildene (se vedlegg B) viser at strømmene trekkes som pulser, snarere enn sinusformet.

Av måleresultatene fremkommer det også at de 3. harmoniske strømmene er de mest dominerende av de overharmoniske komponentene. En av Megaman-lampene skilte seg imidlertid ut med høyere verdier av 7. harmoniske enn

3. harmoniske. Også de 3. harmoniske verdiene varierte betraktelig mellom de ulike lyskildene. LED-lampene fra Osram hadde 3. harmoniske verdier mellom 4,8-9,6 %, mens Megaman-lampene varierte mellom 22,2-69,9 % av den grunnharmoniske strømmen.

Den kan tenkes at den varierende graden av overharmonisk generering fra ulike produkter skyldes at de ulike lampene benytter forskjellige filtermetoder i forkoblingen for å redusere harmonisk strøm. Av artikkelen "An Analysis of Harmonics from LED Lamps"[27] fremkommer det at ulike produsenter benytter ulike former for filtrering av strømmen for å begrense genereringen av harmoniske strømmer. Typiske filtermetoder innebygd i forkoblingen er passive filtere eller aktive filtere. Noen LED-lamper benytter ikke filter i det hele tatt, noe som kan tenkes å være tilfellet for flere av Megaman lampene testet i denne oppgaven. Målingene på LED lamper utført i artikkelen [27] bekrefter også, som i denne oppgaven, at graden av harmonisk generering er svært ulik mellom forskjellige produsenter.

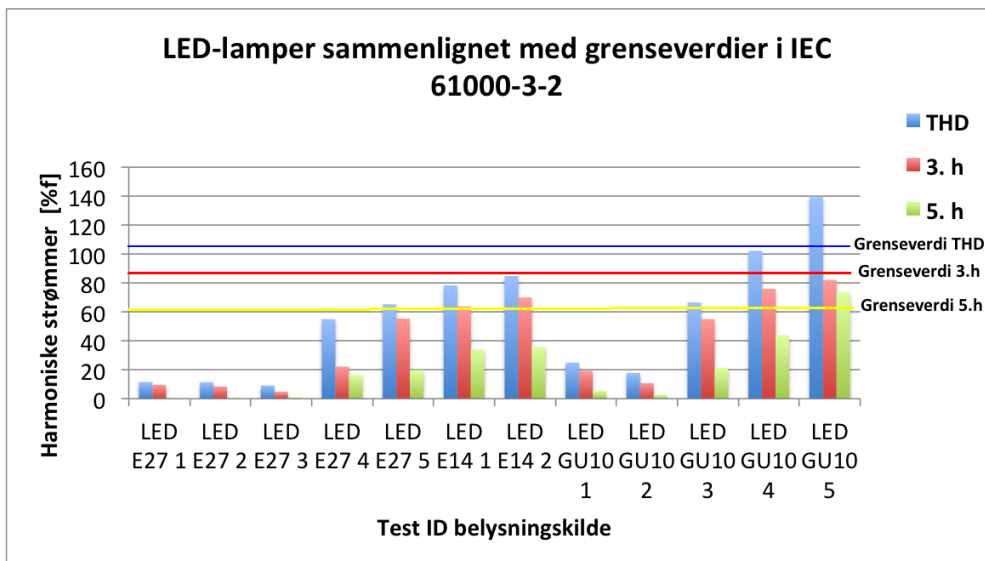
LED-spot GU10-sokkel

Måleresultatene av de ulike LED GU10-spottene viser også stor variasjon i overharmoniske strømmer på tvers av de ulike lyskildene. Lyskildene produsert av Osram (LED GU10 1 og 2) viser igjen lave verdier av THDi og 3. harmoniske strømmer. Disse verdiene er likevel høyere enn verdiene for LED E27-lampene til Osram. LED-spottene fra Megaman (LED GU10 3 og 4) viser imidlertid høye THDi-verdier og høye verdier av 3. harmoniske strømmer. De høyeste verdiene målt på LED-spottene var THD-verdi på 139,2 % og 3. harmoniske på 81,9 %. Disse særdeles høye verdiene av overharmoniske strømmer ble målt på testobjekt LED GU10 5 som er et produkt produsert av Ikea.

LED (E27-, E14- og GU10-sokkel) sammenlignet med grenseverdier i IEC 61000-3-2

Som andre lyskilder må også LED følge krav og direktiver som gjelder produktene. I teorikapittelet på side 25 ble standarden IEC 61000-3-2 med tilhørende grenseverdier for ulike typer forbrukerutstyr presentert. LED-lamper testet i denne oppgaven hadde alle aktiv effekt lavere enn 25 W og kravene på side 26 er derfor gjeldende. Det fremkommer tydelig fra figur 5.3 at noen av LED-lampene generer uakseptabelt høye overharmoniske strømmer, med hensyn på grenseverdiene gitt for lyskilder med aktiv effekt under 25 W i

IEC 61000-3-2. De 3. harmoniske, uttrykt som en prosent av den grunnharmoniske strømmen, skal ikke overstige 86 %, mens de 5. harmoniske ikke skal overstige 61 %. Dette gir en grenseverdi for THDi på omtrent 105 %. Disse grenseverdiene og måleresultatene for LED med E27-, E14- og GU10-sokkel er sammenstilt i figur 5.3.



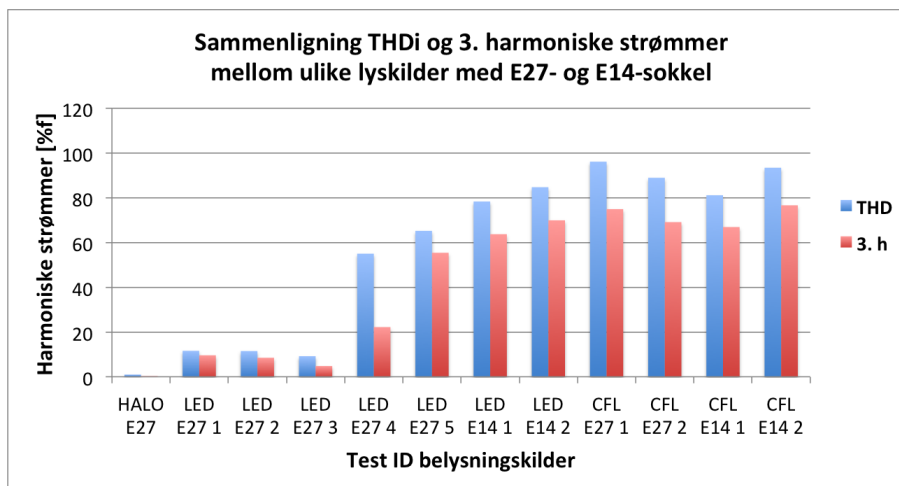
Figur 5.3: Sammenligning av LED med grenseverdier i IEC61000-3-2.

Figuren viser at LED GU10 5 overgår grenseverdien til THDi, samt grenseverdien til 5. harmoniske strømmer. Flere av de andre lyskildene har høye overharmoniske verdier og er nært grenseverdiene. Lyskildene produsert av Osram har imidlertid svært lave verdier av overharmoniske strømmer og er ikke i nærheten av å overgå grenseverdiene.

Resultatene viser at det store variasjoner mellom ”beste” og ”verste” LED med hensyn på overharmoniske strømmer. Ved prosjektering av elektriske installasjoner er det derfor av stor betydning å ha kjennskap til strømkaraktistikkene til enkeltkomponenter, og deretter etterstrebe lavest mulig overharmonisk generering. På den andre siden trekker disse lyskildene svært lave strømmer. Dermed er det grunn til å tro at med mindre det er planlagt en høy tetthet av ”dårlige” LED-produkter vil påvirkningen på elektriske installasjoner være minimal.

Sparelamper E27- og E14-sokkel

Videre ble det også utført målinger på sparelamper for å sammenligne overharmoniske strømmer fra disse og LED-lampene. Figur 5.4 viser en sammenligning av THDi-verdi og 3. harmoniske strømmer fra utvalget av LED og sparelamper med E27- og E14-sokkel. Av resultatene fremkommer det at sparelamper kan generere betydelige overharmoniske strømmer med THDi-verdier mellom 81,1-96,1 % og 3. harmoniske mellom 66,9-76,6 %. Sammenlignet med LED-lampene ligger de overharmoniske verdiene til sparelampene generelt høyere. Det at sparelamper generelt genererer høyere harmoniske verdier enn LED-lamper kan støttes av funnene i en artikkel fra 2012 [30], som har sammenlignet LED og sparelamper med hensyn på harmonisk forstyrrelse.



Figur 5.4: Sammenligning lyskilder med E24- og E14-sokkel.

Til tross for svært høye overharmoniske verdier for samtlige utvalgte sparelamper er verken grenseverdiene til THDi, 3. harmoniske eller 5. harmoniske i IEC 61000-3-2 overgått. Verdiene ligger imidlertid tett opp mot det som er maksimalt tillatt av overharmonisk generering. Av figuren fremkommer det også at halogenlampen (referanselyskilden), genererer tilnærmet ingen harmoniske verdier sammenlignet med LED og sparelamper.

LED- og fluorescerende lysrør

Resultatene (ref. tabell 4.8, s. 56) viser generelt lave THDi-verdier for både LED- og fluorescerende lysrør. Grenseverdiene i IEC 61000-3-2 er dermed ikke overgått. Dette skyldes at både LED- og de fluorescerende lysrørene trekker tilnærmet sinusformet strøm (se vedlegg B). Den høyeste målte THDi-verdien ble målt på testobjekt LED ST8 3 med 16,1 % av grunnharmoniske.

LED-lysørerne LED ST8 1, 2 og 4, samt det fluorescerende lysøreret FL T8 1 ble alle testet i samme lysarmatur med konvensjonell forkobling. Den eneste modifikasjonen var at de ulike lysørerne hadde forskjellige tennere. Resultatene viser at to av LED-lysørerne hadde over dobbelt så høye THDi-verdier som det fluorescerende lysøreret. LED ST8 2 hadde imidlertid både lavere THDi-verdi og 3. harmoniske strømmer enn det fluorescerende lysøreret. Disse resultatene viser at det ikke bare er valg av lysørarmatur som har innvirkning på overharmonisk generering, men også valg av lyskilde. Bruk av LED-lysørerne testet i denne oppgaven vil mest sannsynlig være mest aktuell i allerede eksisterende lysanlegg, der vedlikehold fører til utskiftning av de fluorescerende T8-lysørerne. Til tross for dobbelt så høye THDi-verdier for to av lysørerne er det på bakgrunn av måleresultatene ikke grunn til å tro at LED-lysør vil skape støy i slike installasjoner. På den andre siden ble det kun utført målinger på LED-lysør fra Philips og Osram som er seriøse aktører på markedet. Mindre seriøse aktører kan muligens selge LED-lysør som generer betydelig høyere overharmoniske verdier. Selv om energibesparelsene er store, må det i så tilfelle vurderes om en utskiftning av fluorescerende lysør til LED-lysør er et godt valg med tanke på overharmonisk støy.

Når det gjelder lysørarmaturet med elektronisk forkobling viste det seg at dette genererte lavest overharmoniske av alle lysørtypene og lysørarmaturene. FL T5 1 hadde en THDi-verdi på kun 5,5 % av den grunnharmoniske, og 3. harmoniske på 3,6 %. Som støtte av funnene i denne rapporten ble det også i forprosjektrapporten "Elektrisk støy i yrkesbygg" [13] avdekt at lysørarmatur med elektronisk forkobling som regel genererer mindre overharmoniske, enn konvensjonelt forkoblingsutstyr.

5.3 Målinger på anlegg

5.3.1 Elektrobygget, NTNU Gløshaugen

THD-verdier i stigekabler vurdert mot NEK400:2014 Tillegg 53K

En sammenligning av målte THDi-verdier i Elektrobygget med det informative tillegget i NEK400:2014 (se s. 28), viser betydelige THDi-verdier for begge stigekablene. THDi-verdiene i stigekablene til 3. etg. E- og F-blokk ble målt til henholdsvis 11,4-20,7 % og 15,8-27 %. I NEK400 beskrives THDi-verdier mellom 10-50 % som signifikant forvrengning av strømmens kurveform og at mulige feil kan oppstå i installasjonen som følge av dette. Verdiene i denne tabellen er veiledende for å kunne beslutte om harmonisk overvåkningsutstyr er nødvendig i en installasjon. THDi-verdiene i stigekablene blir i NEK400 ansett som signifikante, der mulige feil kan oppstå i installasjonen som følge av harmonisk forvrengning av fasestrømmene. Samtidig er det god margin før THDi-verdien nærmer seg ≥ 50 %, der forvrengningen anses som stor og der feilfunksjon kan forventes.

En sammenligning av THDu-verdier målt i de to underfordelingene og harmonisk nivå gitt i NEK400 viser normale harmoniske verdier. THDu-verdiene i underfordelingen 3. etg E- og F-blokk ble målt til henholdsvis 1,2-1,4 % og 1,3-1,5 %. THDu < 5 % blir i NEK400 ansett som normale harmoniske verdier. Det er dermed ingen sannsynlighet for uheldige virkninger som følge av harmonisk forvrengning av spenningen.

Målte overharmoniske strømmer i stigekabler vurdert mot dimensjoneringskriterier etter NEK400:2014

Ifølge NEK400 behøver ikke nøytrallederen vurderes dersom flerfasekursen antas å føre balanserte strømmer med neglisjerbare harmoniske strømmer. Derimot ved signifikante trippelharmoniske strømmer i faselederne må termiske virkninger av strømmene vurderes ved dimensjonering. Ifølge avsnitt 524.2.1 i NEK400:2014 (ref. s. 29) skal nøytralleder i trefasekurser være \geq ledertversnittet til faseledere dersom THDi er mellom 15 % og 33 % og der det er sannsynlig med trippelharmoniske strømmer. Som det ble nevnt i forrige avsnitt var THDi-verdiene i stigekablene mellom 11,4-20,7 % og 15,8-27,4 %. De to stigekablene som det ble utført målinger på har begge nøytralledere med samme ledertversnitt som faselederne.

NEK400 har videre gitt normative reduksjonsfaktorer for 4- og 5-lederkabler som tar hensyn til termiske virkninger ved tilstedeværelse av trippelharmoniske strømmer. Da stigeledningene i Elektrobygget er 4-lederkabler av samme ledermateriale og ledertverrsnitt gjelder reduksjonsfaktorene gitt i tabell 2.6 på side 30. Av tabellen fremkommer det at 3. harmoniske strømmer på 15-33 % av den grunnharmoniske behøver en reduksjonsfaktor på 0,86. Måleresultatene på stigeledningene viser at det 3. harmoniske innholdet for stigeledningene til 3. etg. E- og F-blokk er henholdsvis mellom 10,8-15,8 % og 10,7-21 %. Ved prosjektering av liknende typer bygg er det grunn til å tro at bruk av reduksjonsfaktor må vurderes. Stigeledninger som er forventet å føre betydelige 3. harmoniske (eller andre trippelharmoniske) strømmer må i utgangspunktet benytte reduksjonsfaktorer ved dimensjonering siden disse summeres i nøytrallederen. Strømmålingene i E- og F-blokken viser en lav belastning i forhold til forankoblet vern (maksimalt 12 % i faseledere og 1 % i nøytralleder). Med hensyn på 3. harmoniske strømmer kunne tverrsnittet i stigeledningene i E- og F-blokken vært mindre, og likevel håndtert de termiske virkningene pga. tilstedeværelse av 3. harmoniske.

Vurdering av overharmoniske strømmer på kursnivå

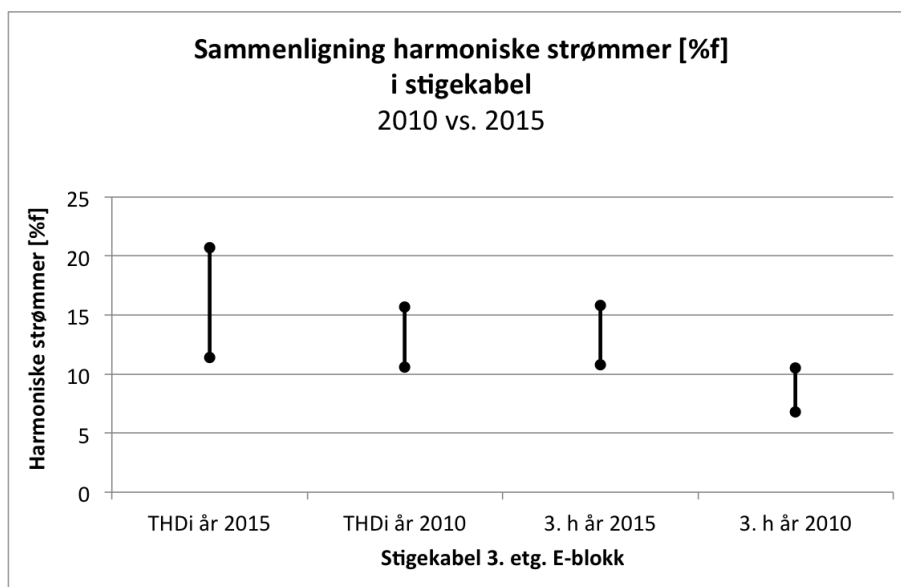
Måleresultatene på kursnivå (ref. tabell 4.11, s. 61) viser at THDi-verdien til tre av fire lyskurs er lave og normale verdier sammenlignet med harmonisk nivå i NEK400 (ref. s. 28). En av lyskursene har imidlertid betydelig THDi-verdi med 20,4 % av den grunnharmoniske. Ifølge NEK400 er dette en signifikant forvrengning av tilførselstrømmen og mulige feil i installasjonen kan oppstå som følge av dette. Av de overharmoniske enkeltkomponentene var de 3. harmoniske strømmene størst for alle lyskursene. Kun sistnevnte kurs hadde dog betydelige 3. harmoniske strømmer, med 15,7 % av strømmens RMS-verdi. Samtidig var belastningsgraden på kursen svært lav. Kun ved høyere belastning er det grunn til å tro at slike 3. harmoniske verdier kan forstyrre andre apparater eller skade installasjonen.

Stikkontaktkursene viste seg å inneholde store andeler overharmoniske strømmer, da disse typisk forsyner datautstyr. Målingene på stikkursene viser generelt lav belastning på disse kursene i forhold til forankoblet vern. Den høyest belastede stikkontaktkursen hadde en $I_{rms} = 1,4$ A, med en THDi-verdi på 18,8 %. De to andre stikkontaktkursene hadde svært lave tilførselstrømmer, men svært høye THDi-verdier og 3. harmoniske strømmer. Med en slik lav belastning på kursene, anses ikke forvrengningen å kunne utgjøre en trussel for verken forsyningsspenningen eller overbelastning av N-leder. Hvis belast-

ningen derimot blir større på flere stikkontaktkurser samtidig kan det føre til signifikante 3. harmoniske strømmer i anlegget.

Sammenligning av målte harmoniske verdier i 2015 og 2010

Som nevnt tidligere ble det i 2010 gjort målinger på stigekabelen, lyskurser og kurser til stikkontakter i E-blokken. Resultatene av disse målingene er gitt i vedlegg H. En sammenligning av målte overharmoniske strømv verdier i stigekabelen er samlet i figur 5.5. Resultatene gir en indikasjon på at strømforvrengningen er noe høyere i 2015 sammenlignet med 2010. THDi-verdien for faselederne varierte i 2015 mellom 11,4-20,7 %, sammenlignet med 10,6-15,7 % i 2010. Både de nye og gamle målingene viser at 3. harmoniske strømmer er de mest fremtredende overharmoniske verdiene. De 3. harmoniske strømmene i faselederne varierte mellom 10,8-15,8 % i 2015, sammenlignet med 6,8-10,5 % i 2010. Resultatene viser altså at det lavest målte 3. harmoniske nivået i 2015 er på høyde med det høyeste 3. harmoniske nivået i 2010.



Figur 5.5: Sammenligning målinger 2010 og 2015 av THDi og 3. h i stigekabel 3. etg E-blokk.

På den andre siden er ikke måledataene fra 2010 grunnlag nok til å konkludere med at den nye installasjonen generelt skaper mer overharmoniske strømmer i stigekabelen enn den nye. Strømv verdiene i installasjonen endrer

seg kontinuerlig gjennom dagen, noe som tilsier at verdiene ikke er absolutte. Aller helst skulle både målingene fra 2010 og 2015 logget strøm- og spenningsverdier over lengre perioder, gjerne en hel uke. Da hadde måledataen vært mer sammenlignbare. Likevel gir målingene fra 2010 en indikasjon på hvilke harmoniske verdier og harmoniske enkeltkomponenter som er mest fremtredende i installasjonen da, sammenlignet med nå.

En sammenligning mellom spenningsverdiene fra 2010 (ref. figur H.1, vedlegg H) og måleresultatene fra 2015 (ref. tabell 4.10, s. 60) viser nokså like harmoniske verdier i underfordelingen. Målingene fra 2015 viser en THDu på 1,2-1,4 %, mens de gamle målingene viser mellom 1,0-1,2 %. I begge tilfellene er det lave og svært vanlige THDu-verdier.

Store deler av lysinstallasjonen i E-blokken er som kjent byttet ut fra eldre konvensjonelle lyskilder til LED. I den gamle installasjonen forsynte to kurser lysarmaturene med konvensjonell forkobling i korridor øst og vest. De gamle lysarmaturene i korridorene er byttet ut med LED-downlights, og lyskursene er trukket om. I den nye installasjonen forsyner lyskursene til korridorene også kontorer. Kurs F81 forsyner LED-lys i korridor vest, samt åtte kontorer med nedhengte LED-armaturer. Kurs F83 forsyner LED-lys i korridor øst, og to kontorer med nedhengte LED-armaturer. I målingene fra 2010 ble det kun utført målinger på en av korridor-kursene. En sammenligning av de gamle målingene på lyskursen til korridorene (ref. figur H.2 i vedlegg H) og de nye målingene viser en lavere THDi av tilførselstrømmen i den nye installasjonen. Tilførselstrømmen til de nye lyskildene har en THDi på 7,8% og 7,1%, sammenlignet med 25,9% tidligere. De 3. harmoniske, som prosentandel av RMS-strømmen, er redusert fra 20,4% til 4,6-4,8% i den nye installasjonen. Resultatene viser altså at armaturene med konvensjonell forkobling i den gamle installasjonen generer betydelig høyere overharmoniske verdier enn LED-armaturene i den nye installasjonen.

Lyskursene som hovedsakelig forsyner lyskilder i servicelaben er også omstrukturert. Tidligere forsynte flere kurser lyskildene i servicelaben, men nå er det kun én lyskurs (kurs nr. F80) som forsyner alle rommene i servicelaben, samt et møterom. Lyskildene på kurs F80 er en blanding mellom flere typer lyskilder. Lyskursen forsyner noen få LED-armaturer, men hovedsakelig lysrørarmaturer med elektronisk forkobling. En sammenligning av måleresultatene fra 2010 og 2015, viser THDi-verdien og 3. harmoniske strømmen er noe lavere i 2015. I 2015 ble THDi målt til 8,7 %, sammenlignet med 13,3 og 14,2 % i 2010. De 3. harmoniske strømmene er redusert fra 12,8 % og 13 % til 7,3 % i 2015. Det er for få LED-armaturer på kursen til å kunne si at denne reduksjonen i overharmoniske verdier skyldes bruk av LED-armaturer kontra

konvensjonelle lysarmaturer. Det er imidlertid tydelig at de nye lysrørarmaturene generer lavere verdier av overharmoniske enn de gamle lysarmaturene som var benyttet i installasjonen.

Lyskurs F82 forsyner sju kontorer med nedhengte LED-armaturer, en lyslab som innehar 15 lysrørarmatur med elektronisk forkobling, samt et møterom med LED-armatur. Av måleresultatene fra 2015 fremkommer det at dette er den lyskursen med høyest THDi-verdi (20,4 %) og 3. harmoniske strømmer (15,7 %). I 2010 ble det gjort én måling på lyskurs til kontorer. THDi ble målt til 16,3 %, mens 3. harmoniske ble målt til 14,5 %. Siden lyskursen (kurs nr. F82) målt i 2015 forsyner så mange ulike lyskilder, er det vanskelig å gjøre en direkte sammenligning av overharmoniske verdier på lyskursen til kontorer. Samtidig viste målingene på kurs F83, som forsyner åtte kontorer med nedhengte LED-armaturer, en lav THDi-verdi og 3. harmoniske strømmer. Dermed kan det være grunn til å tro at de høye harmoniske verdiene på lyskurs F82 skyldes kombinasjonen av de femten lysrørarmaturene med elektronisk forkobling på lyslaben (rom E320) og LED-armaturene på kontorene.

En generell vurdering av overharmoniske verdier på lyskursene viser generelt lavere verdier av THDi og 3. harmoniske strømmer i den nye installasjonen. Kun én av de nye lyskursene har en THDi-verdi og 3. harmoniske strømmer som er like høy som de målte verdiene på lyskursene i 2010.

5.3.2 Brattørkaia 15, Trondheim

THD-verdier vurdert mot NEK400:2014 Tillegg 53K

En sammenligning av målte THDi-verdier i stigeledningene (ref. tabell 4.12, s. 62) og tabell 2.5, viser nesten uten unntak betydelige THDi-verdier. Sett bort i fra kun én av de åtte stigeledningene viser det seg at THDi for stigeledningene befinner seg mellom 10 % og 50 %. Dette blir i NEK400 ansett som en signifikant forvrengning av strømmens kurveform, som kan føre til at feil oppstår i installasjonen. I det verste tilfellet er THDi for en av faselederne målt til 44,2 %. Med en slik forvrengning av fasestrømmen begynner det å nærme seg svært høye THDi-verdier. $\text{THDi} \geq 50\%$ anses nemlig som stor forvrengning, der feilfunksjon er forventet.

En kombinasjon mellom vanskeligheter med å komme til i hovedfordelingen og sikkerhetsmessige grunner ble det ikke utført spenningsmålinger i hovedfordelingen. Det ble imidlertid foretatt spenningsmålinger i nærmeste under-

fordeling. Det kan antas at forskjellene i spenning mellom hovedtavlen og underfordelingen er marginale. THDu-verdiene varierte mellom 0,8 % og 1,0 %, og var dermed av tilfredsstillende verdi. Dette blir ansett som normale verdier der uheldige virkninger på installasjonen er høyst usannsynlig.

Målte overharmoniske strømmer vurdert mot dimensjoneringskriterier etter NEK400:2014

Av resultatene (ref. tabell 4.12, s. 62) fremkommer det at THDi-verdiene nesten uten unntak er mellom 10 % og 50 % for stigekablene. En sammenligning av THDi-verdiene og kravene i NEK400 (se s. 29), viser at nøytral-lederen i stigekablene skal være \geq ledertversnittet til faselederne. I denne installasjonen var alle nøytrallederne til stigekablene av samme tversnitt som faselederne.

Måleresultatene på stigekablene (ref. 4.12, s. 62) viser at fem av stigekablene har fasestrømmer med betydelig 3. harmonisk strøm. Stigekabel XQ102, -105, -107, -108 og -109 har alle 3. harmoniske strømmer innenfor intervallet på 15-33 % av den grunnharmoniske. I NEK400 anbefales bruk av reduksjonsfaktoren 0,86 ved dimensjonering av kabler som skal føre tilsvarende 3. harmoniske strømmer. Strømmålingene viser at stigekablene er kraftig overdimensjonert. Belastningen på de ovennevnte stigekablene varierte mellom 5-30 % av merkestrømmen på forankoblet vern, og denne installasjonen er dermed dimensjonert for å håndtere betydelige 3. harmoniske strømmer.

Måleresultatene viser at stigekabel XQ107 hadde den høyest målte 3. harmoniske strømmen (34 %). Resultatene viser også at kablen på det meste hadde en N-lederstrøm på $I_{rms} = 18,8$ A, men strømmen var imidlertid kun 20 % av forankoblet vern. Strømmene er dermed ikke høye nok til å kunne skade N-lederen. Stigekabelen med høyest N-lederstrøm i forhold til forankoblet vern (kurs XQ101) hadde en belastningsgrad på 30 %. Denne kablen hadde imidlertid 3. harmoniske verdier på kun 4,1-8,5 %. De høye N-lederstrømmene i denne kablen skyldes altså ikke trippelharmoniske, men skjevfordeling i installasjonen.

Ved en høyere belastning og like høye 3. harmoniske verdier kunne derimot strømmene i N-leder blitt for høye. Av resultatene fremkommer det at dimensjonering av stigekabler som forsyner teknisk og lys i kontorbygg som er bygget som passivhus må bruk av en reduksjonsfaktor 0,86 vurderes. Bygg som prosjekteres uten elektrisk oppvarming, og med et stort antall datalaster, samt store belyningsanlegg bør ta hensyn til de termiske virkningene i

kabler som skyldes trippelharmoniske.

Generell betraktning av måleresultatene

De høye harmoniske verdiene i stigekablene kan skyldes kombinasjonen mellom høy tetthet av datautstyr og at kontorbygget er et passivhus. Oppvarmingen av bygget skjer ved hjelp av fjernvarme, samt varme fra mennesker, elektriske apparater og belysning. Det er dermed grunn til å tro at andelen ohmske (lineære) laster er nokså lav i dette bygget. L2-lederen i stigekabel XQ107 var den med høyest målte THDi-verdier og 3. harmoniske strømmer av alle stigekablene. Det kan tyde på at L2-lederen forsyner en høy andel datautstyr grunnet den spisse strøamplituden til fasestrømmen (ref. figur 4.14a, s. 63).

Én av stigekablene (XQ106) hadde imidlertid uvanlig lave THDi-verdier og 3. harmoniske strømmer. Den totale harmoniske forvrengningen av strømmen ble målt til 2,1-6,5 % og 3. harmoniske strømmer mellom 1,4-5,0 %. Denne stigekabelen forsyner en underfordeling i 1. etg. i bygget som videre forsyner kurser til teknisk, lys og en kantine. En forklaring på de lave THDi-verdiene kan være at en stor andel av lastene i kantine er lineære laster. Av disse måleresultatene er det dermed grunn til å tro at kurser med blandede lastkilder (både lineære og ulineære lastkilder), er et effektivt tiltak for å dempe de overharmoniske strømmene i kablene.

Målingene på kursnivå (ref. tabell 4.13, s. 64) viser lave overharmoniske verdier for lyskursene. Lyskursene til LED-armaturene i glassgården viser THDi-verdier på 10,1 % og 9,7 % av den grunnharmoniske, og 3. harmoniske på 9,0 % og 5,7 % av RMS-strømmen. Lyskursen som forsyner lysrørarmaturet med elektronisk forkobling på kontoret har lavere harmoniske verdier enn LED-armaturene.

Målingene på stikkontaktkursen til kontor og møterom (kurs XQ113) viser svært høye harmoniske verdier. THDi-verdien ble målt til 71,7 % av den grunnharmoniske, mens de 3. harmoniske strømmene ble målt til 48,7 % av RMS-strømmen. Belastningen på kursen var imidlertid kun 1,0 A, som tilsvarer ca. 6 % av forankoblet vern. Selv om de 3. harmoniske strømmene var betydelige i kurskabelen, er det liten fare for overbelastning av fase- og nøytralledere med en tilsvarende lav belastningsgrad. En større belastning på tilsvarende kurstyper kan imidlertid skape signifikante 3. harmoniske strømmer i anlegget.

5.3.3 P15-bygget, NTNU Gløshaugen

THD-verdier vurdert mot NEK400:2014 Tillegg 53K

En sammenligning av de målte THDi-verdiene i P15-bygget og tillegg 53K (ref. s. 28) viser svært høye verdier i stigekabelen. Måleresultatene (ref. figur 4.19, s. 67) viser at faseleder L1 i stigekabelen har en THDi-verdi som varierer omkring 58 %, mens faselederne L2 og L3 har THDi-verdier som varierer omkring 30 %. Forvrengningen i faseleder L1 anses av NEK400 som stor forvrengning ($\text{THDi} \geq 50\%$) der feilfunksjon er forventet. Også faselederne L2 og L3 har betydelig forvrengning av strømmen, og ifølge tillegg 53K i NEK400:2014 er det sannsynlig at mulige feil kan oppstå som følge av dette.

Måleresultatene av THDu-verdiene i underfordelingen (ref. tabell 4.15, s. 67) viser svært lave nivåer (0,8-1,0 %). Ifølge NEK400 er dette normale THDu-verdier og det er dermed ingen sannsynlighet for uheldige virkninger som følge av dette.

Målte overharmoniske strømmer vurdert mot dimensjoneringskriterier etter NEK400:2014

Måleresultatene av strømverdiene i stigekabelen (ref. tabell 4.14, s. 66) viser betydelige strømmer i N-leder. Strømmen i N-leder varierer mellom 13,7-13,9 A over måleperioden, mens to av fasestrømmene varierer omkring 13-14 A. Den høye nøytrallederstrømmen skyldes til dels skjevlast, men også fordi fasestrømmene har et betydelig innhold av harmoniske som ikke nulles ut i N-lederen. Som nevnt i forrige avsnitt varierte THDi mellom 30,3-58,3 %, mens det 3. harmoniske innholdet i fasestrømmene varierte mellom 20,3-37,3 %. Stigekabelen er en 4-lederkabel med nøytralleder av samme tverrsnitt som faselederne. Dermed gjelder tillegg 52D i NEK400:2014 (ref. s. 29). En sammenligning av de 3. harmoniske strømverdiene i stigekabelen og harmoniske nivå i tabell 2.6 viser at bruk av reduksjonsfaktorene i utgangspunktet er nødvendig. Av tabell 2.6 fremkommer det at 3. harmoniske strømmer på 15-33 % av den grunnharmoniske behøver en reduksjonsfaktor på 0,86, der ledertverrsnittet blir valgt på basis av fasestrømmen. 3. harmoniske strømverdier innenfor 33-45 % behøver en reduksjonsfaktor på 0,86, der ledertverrsnittet blir valgt på basis av nøytrallederstrømmen. Strømmålingene viser imidlertid at belastningsgraden for også denne stigekabelen er relativt lav og at stigekabelen er kraftig overdimensjonert. På bakgrunn av dette er det grunn til å tro at strømføringen i kabelen er tilfredsstillende i forhold til strømføringsevnen.

Ved dimensjonering av stigekabler i liknende typer bygg er det tydelig at en overdimensjonering vil være hensiktsmessig. På bakgrunn av måleresultatene kan det derfor anbefales en reduksjonsfaktor på 0,86 for stigekabler.

Generell betraktning av måleresultatene

Av resultatene fremkommer det tydelig at tettheten av datautstyr i kontor- eller undervisningsbygg har stor innvirkning på harmonisk forvrengning. I dette bygget var det fire store datasaler som opptok det meste av arealet i etasjen. Strømkurvene til stigekabelen (ref. figur 4.19a, s. 67) viser tydelige tegn på at etasjen inneholder en stor andel datautstyr, siden fasestrømmene i stigekabelen har høye strømpulser. Måleresultatene på enkeltkurser til stikkontakter i datasalene og lyskilder viser at grunnen til de høye harmoniske verdiene i stigekabelen skyldes datautstyret i etasjen. Målingene på enkeltkurser (ref. tabell 4.16, s. 68) viser at stikkontaktkursene har THDi-verdier mellom 115-149 %, og 3. harmoniske strømmer på 50-52 % av RMS-strømmen. Lyskursen (XQ020) som forsyner lysrørarmaturer med elektronisk forkobling hadde kun THDi-verdi på 10 % og 3. harmoniske på 8,3 % av RMS-strømmen.

5.3.4 Generell betraktning av målinger på anlegg

Alle stigekabler og underfordelinger det ble foretatt målinger på i de tre anleggene forsynte teknisk utstyr og lysanlegg. Av denne rapporten fremkommer det at en stor andel av stigekablene inneholdt betydelige harmoniske verdier og da spesielt 3. harmoniske strømmer. På bakgrunn av funnene i denne rapporten fremkommer det at elektronisk utstyr bør tas hensyn til ved dimensjonering av anlegg. Harmoniske strømmer generert av 1-faseapparater som datamaskiner, monitorer, printere o.l., er hver for seg for små til å forårsake nevneverdig innvirkning på elektriske anlegg. Men med en høy tetthet av denne typer belastninger, samt større ulineære lastkilder som f.eks. frekvensomformere i varmpumper og ladesystemer til elbiler kan den samlede harmoniske påvirkningen bli stor.

Graden av problemer som harmoniske strømmer skaper avhenger imidlertid ikke bare av karakteristikkene til de ulineære lastkildene, men også utformingen av de elektriske installasjonene. Dette fremkommer tydelig fra måleresultatene på stige- og kurskabler i denne rapporten. Det er ikke grunn til å tro at prosentandelen av ulineære lastkilder i forhold til lineære lastkilder vil reduseres i årene som kommer. Det bygges stadig flere passivhus og plussus

der andelen lineære lastkilder kan antas å være lav. Dette vil stille høye krav til riktig dimensjonering av elektriske anlegg i fremtiden. Ved å ta i bruk preventive tiltak ved dimensjonering av anlegg kan graden av forstyrrelse og skade fra ulineære lastkilder reduseres betraktelig. Elektriske anlegg med overdimensjonerte nøytralledere og transformatorer er generelt godt egnet til å håndtere en høy andel overharmoniske strømmer.

4-leder stigekabler som forsyner underfordelinger til teknisk utstyr og belysningsanlegg i yrkesbygg bør vurdere mulighetene for høye trippelharmoniske verdier og dermed høye nøytralstrømmer. Reduksjonsfaktorene presentert i NEK400 bør vurderes ved dimensjonering av elektriske anlegg der andelen elektronisk utstyr som generer trippelharmoniske er forventet å være høy. De tre anleggene som det ble utført målinger på i denne rapporten hadde alle overdimensjonerte stigekabler. Belastningen på faselederne i stigekablene var nesten uten unntak mellom 10-30 % av merkestrømmen på forankoblet vern, mens belastningen på nøytralleder var nesten uten unntak mellom 7-28 %. Kun én av de målte stigekablene hadde en belastning på 48 %. Forprosjektrapporten "Elektrisk støy i yrkesbygg" [13] som utførte en rekke målinger på yrkesbygg i 2001 viser, som i denne rapporten, at elektrotekniske anlegg i yrkesbygg generelt er svært overdimensjonerte. Av målingene i rapporten fra 2001 fremkommer det at belastningen på stige- og kurskabler generelt var mellom 10-30 % av dimensjonert kapasitet [13]. Ved overdimensjonering av kabler vil ikke betydelige 3. harmoniske strømmer skape problemer i installasjoner, men dette gjør imidlertid installasjonen dyrere.

En forvrengning av forsyningsspenningen kan oppstå som følge av overharmoniske strømmer som flyter i anlegg. Spenningsmålinger på de utvalgte anleggene viste imidlertid lave og normale harmoniske verdier. I anlegg med svakere nettforsyning (lavere kortslutningsytelse) kan tilsvarende overharmoniske strømmer som ble målt på anleggene utgjøre større innvirkning på forsyningsspenningen, enn det som ble målt i denne rapporten. En forvrengning av spenningen kan gi negative virkninger for annet tilkoblet utstyr og komponenter. Det er grunn til å tro at pulsstrømmer med betydelig amplitude kan flate ut toppverdien til forsyningsspenningen. Dette kan medføre at utstyr trekker høyere strømmer for å opprettholde effekten. En større strøm gir høyere varme i komponenter, som videre kan føre til havari av utstyr. I bygg som det er forventet en stor andel datautstyr vil det nok på bakgrunn av ovennevnte være gunstig å utføre tiltak for å redusere toppamplituden til pulsstrømmen.

En undersøkelse av kurser som forsyner lysanlegg i de tre byggene viser generelt lave harmoniske verdier. Omtrent 90 % av de utvalgte lyskursene har

THDi-verdier mellom 7-10 % av den grunnharmoniske, og 3. harmoniske mellom 4-9 % av RMS-strømmen. Lyskildene på disse kursene er lysrørarmaturer og downlights med elektronisk forkobling, samt LED-armaturer. Av måleresultatene i denne rapporten er det dermed grunn til å tro at bruk av reduksjonsfaktor på 4-lederkabler til lys i de aller fleste tilfeller vil være unødvendig. Denne påstanden kan støttes av funnene i rapport "Elektrisk støy i yrkesbygg" [13]. Rapporten er imidlertid fra 2001 og mye har skjedd på belysningsfronten, spesielt innenfor LED. Likevel viser måleresultatene i denne oppgaven å være nokså lik funnene i rapporten "Elektrisk støy i yrkesbygg".

Harmoniske verdier i enkeltkurser til stikkontakter viste imidlertid svært høye verdier. For 85 % av de utvalgte stikkontaktkursene viste THDi-verdier mellom 70-170 % av den grunnharmoniske, og 3. harmoniske mellom 25-52 % av RMS-strømmen. Belastningen på stikkontaktkursene var imidlertid ikke høyere enn 10 % av merkestrømmen på forankoblet vern. Hvis det prosjekteres med høyere belastning på liknende kurser er det grunn til å tro at bruk av reduksjonsfaktor mellom 1-0,86 valgt på basis av nøytrallederstrømmen vil være hensiktsmessig for å beskytte installasjonen. Hvis det antas 3. harmoniske strømmer på 52 % av RMS-strømmen, vil belastningen på nøytrallederen for en 16A-kurs ved en belastningsgrad på 100 % teoretisk bli: $I_N = 3 \cdot 0,52 \cdot 16A \approx 25A$. Dette viser viktigheten av å sikre nøytrallederen med vern, samt en at en overdimensjonering av 3-fasekurser til datautstyr kan være hensiktsmessig. Videre hvis det antas at en 3-fasekurs med 16 A sikring forsyner datautstyr med 3. harmoniske på 52 % av RMS-strømmen, vil en utkobling av nøytrallederen grunnet overbelastning skje ved en belastningsgrad på: $\text{Belastningsgrad} = \frac{16A}{3 \cdot 0,52 \cdot 16A} \cdot 100\% = 64\%$ Av dette fremkommer det at belastningsgraden er viktig å ta hensyn til ved bruk av reduksjonsfaktorene gitt i NEK400.

5.3.5 Anbefalte reduksjonsfaktorer i kontor- og undervisningsbygg

På bakgrunn av måleresultatene i denne rapporten er det forsøkt å anbefale reduksjonsfaktorer for ulike typer bygg og lastkilder (tabell 5.1). Bruk av reduksjonsfaktorer må imidlertid vurderes i sammenheng med prosjektert utnyttelsesgrad til kurser, samt andre dimensjoneringskriterier.

Tabell 5.1: Anbefalte red.faktorer for 4- og 5-lederkabler med hensyn på 3. harmoniske strømmer.

Anleggspunkt	Anbefalt reduksjonsfaktor		
	Kombinasjonsbygg (undervisnings- og kontorbygg)	Kontorbygg (passivhus)	Yrkesbygg med datasaler o.l.
Stigekabel teknisk og lys	1-0,86*	0,86*	0,86*
Kurskabel belysning	1*	1*	1*
Kurskabel stikk (til datautstyr)	1-0,86**	1-0,86**	1-0,86**
* Ledertverrsnitt valgt på basis av fasestrøm.			
** Ledertverrsnitt valgt på basis av nøytrallederstrøm.			

5.4 Videre arbeid

Denne rapporten har undersøkt og drøftet problemstillinger som vil være aktuelle i årene som kommer. Som følge av oppgavens omfang er ikke alle temaene betraktet like grundig. I videre arbeid kan det være interessant å undersøke følgende:

- Overharmoniske strømmer og spenninger i andre typer bygg, eksempelvis
 - helsebygg
 - industribygg
 - kulturbygg
- Harmonisk generering fra andre typer ulineære laster, eksempelvis
 - ladesystemer til elbiler
 - UPS-systemer
 - medisinsk utstyr
 - industrielle laster som sveiseapparater, induksjonsovner og lysbueovner
- Kartlegge toleranser for sensitivt utstyr med hensyn på overharmoniske strømmer og spenninger i anlegg.
- Undersøke overharmoniske strømmer og spenninger i større lysanlegg, eksempelvis i store idrettshaller eller industrihaller.
- Utføre teknisk/økonomisk analyse av dimensjoneringen i typiske yrkesbygg og samtidig ta hensyn til harmoniske strømmer i installasjonen. Av oppgaven fremkommer det at elektriske installasjoner i yrkesbygg kan være svært overdimensjonerte.

Kapittel 6

Konklusjon

På bakgrunn av laboratoriemålingene og målingene på anlegg, kan det konkluderes med følgende:

- Måleresultatene for bærbare datamaskiner og monitører bekrefter at disse lastkildene genererer vesentlige overharmoniske strømmer. 3. harmoniske strømmer var den mest dominante overharmoniske strømmen, med 3. h [%f] mellom 90-100 %, for både de bærbare datamaskinene og PC-monitorene. Dette bør tas hensyn til ved dimensjonering av installasjoner med en stor andel datautstyr.
- Måleresultatene for LED-lyskilder viser svært varierende overharmoniske verdier mellom ulike produsenter. Måleresultatene for sporelamper viste generelt høyere verdier av THDi og 3. harmoniske strømmer enn for LED. Både LED og sporelamper hadde harmonisk emisjon tett opp mot grenseverdier i standarden EN61000-3-2, men individuelt er disse lastkildene for små til å skape problemer i en installasjon.
- Videre viste målinger at lysrørarmatur med elektronisk forkobling genererte lavere harmoniske verdier, enn LED- og fluorescerende lysrør i lysrørarmatur med konvensjonell forkobling.
- Målinger på anlegg viser at de fleste stige-kablene det ble foretatt målinger på inneholdt betydelige overharmoniske strømmer. Flere av stige-kablene hadde THDi-verdier mellom 10-50 %. Dette blir i NEK400 ansett som en signifikant forvrenging av tilførselstrømmen.
- Basert på målingene i kontor- og undervisningsbygg bør nøytralleder ha minimum samme tverrsnitt som faseledere, samt at 4-polt vern bør benyttes på kurser til lastkilder som forventes å trekke betydelige 3.

harmoniske strømmer.

- Flere 4-lederkabler skulle i utgangspunktet, på bakgrunn av andelen 3. harmoniske strømmer, hatt behov for reduksjonsfaktorer i henhold til NEK400. Det viste seg imidlertid at alle 4-lederkablene i byggene var kraftig overdimensjonert. Belastningen på faselederne i stigekablene var nesten uten unntak mellom 10-30 % av merkestrømmen på forankoblet vern, mens belastningen på nøytralleder var nesten uten unntak mellom 7-28 %.
- THDu var gjennomgående på et normalt nivå ($THDu < 5\%$). Bygg med lav kortslutningsytelse (svak nettforsyning) og stor andel ulineære lastkilder bør imidlertid vurdere tiltak for reduksjon av harmoniske strømmer.
- Harmoniske verdier i enkeltkurser til lysanlegg viser generelt lave verdier. Omtrent 90 % av de utvalgte lyskursene hadde THDi-verdier mellom 7-10 % av den grunnharmoniske, og 3. harmoniske mellom 4-9 % av RMS-strømmen.
- Harmoniske verdier i enkeltkurser til stikkontakter viste imidlertid svært høye verdier. For 85 % av de utvalgte stikkontaktkursene viste THDi-verdier mellom 70-170 % av den grunnharmoniske, og 3. harmoniske mellom 25-52 % av RMS-strømmen.
- På bakgrunn av funnene i oppgaven anbefales det å benytte følgende reduksjonsfaktorer ved dimensjonering av 4-lederkabler:
 - 0,86 ved dimensjonering av stigekabler til teknisk og lys i yrkesbygg.
 - 1-0,86 ved 4-leder stikkontaktkurser, der ledertverrsnittet blir valgt på basis av N-lederstrømmen.
 - Ingen reduksjonsfaktor for lyskurser.

Bibliografi

- [1] A. H. Chowdhury A. Mansoor, W. M. Grady and M. J. Samotyj. An investigation of harmonics attenuation and diversity among distributed single-phase power electronic loads. *IEEE*, 1995.
- [2] Angelo Baghini and Zbigniew Hanzelka. *Handbook of Power Quality*, chapter 7 - Voltage and Current Harmonics. John Wiley & Sons, 2008.
- [3] Hans-Henrik Bjørset and Eilif Hugo Hansen. *Lysteknikk*. Classica forlag AS, 2006.
- [4] Digi-Key. Fluke 80i-110s. <http://www.digikey.com/product-detail/en/80I-110S/614-1090-ND/1983120> Hentet: 01.06.2015.
- [5] Eaton Electric AS. *STORE BLÅ HÅNDBOK for Inntak i boliger og elektriske installasjoner etter FEL og NEK 400 IT, TT og TN-S-nett*, 2010.
- [6] Elektroforeningen. *Informasjon om elektronisk forkobling i lysarmaturer*, 2005.
- [7] Fagerhult Belysning AB. *LED – belysningens fremtid*, 2012.
- [8] Fluke Corporation. *Fluke 43 Power Quality Analyzer - Applications Guide*, 1998.
- [9] Fluke Corporation. *Fluke 434/435 Three Phase Power Quality Analyzer - Users Manual*, 2008.
- [10] Glamox.no. Grunnleggende om led. <http://glamox.com/no/grunnleggende-om-led> Lest: 16.03.2015.
- [11] Mack Grady. Understanding power system harmonics. Technical report, Dept. of Electrical & Computer Engineering - University of Texas at Austin, 2012.

- [12] Eilif Hugo Hansen. *Elektroinstallasjoner*. Classica forlag AS, 2010.
- [13] Arne Jorde. Elektrisk støy i yrkesbygg. Technical report, InterConsult Group ASA, 2001.
- [14] Hussain Shareef Khodijah Mohamed and Azah Mohamed. Analysis of harmonic emission from dimmable compact fluorescent lamps. *IEEE*, 2011.
- [15] Lovdata.no. Forskrift om leveringskvalitet i kraftsystemet. <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2004-11-30-1557>
Lest: 20.02.2015.
- [16] Lyskultur. *Lysdioder til belysning 2010 - status for fremtidens lyskilde*, 2010.
- [17] Philip J. Moore and Iliana E. Portugués. The influence of personal computer processing modes on line current harmonics. *IEEE*, 2003.
- [18] Norsk Elektroteknisk Komite (NEK). *NEK 400:2014*, 2014.
- [19] Norsk Elektroteknisk Komite (NEK). *NEK EN 61000-3-2:2014*, 2014.
- [20] NTNU. Romoversikt høgskoleringen 3. <http://www.ntnu.no/kart/gloeshaugen/hoegskoleringen-3/4-etasje/>
Hentet: 01.06.2015.
- [21] NTNU.no. Kart gløshaugen. <http://www.ntnu.no/kart/gloeshaugen/elektro-e/3-etasje/>
Lest: 13.05.2015.
- [22] Philips. *Electronic fluorescent ballasts*, 2012.
- [23] Regjeringen.no. Tradisjonelle glødepærer fases ut. <https://www.regjeringen.no/nb/aktuelt/tradisjonelle-glodeparer-fases-ut-/id574759/> Sist oppdatert: 01.09.2009 Lest: 13.05.2015.
- [24] Kjell Sand. Power system harmonics. Powerpoint-presentasjon forelesning i ELK 10 Quality of Supply in Electrical Power Systems, s. 12. Hentet 31.05.2015.
- [25] Kjell Sand. Leveringskvalitet - en oversikt. Technical report, Sintef Energi AS, 2008.
- [26] Schneider Electric. *Electrical installation guide - According to IEC International Standards*, 2008.

- [27] Azah Mohamed Sohel Uddin, Hussain Shareef and M A Hannan. An analysis of harmonics from led lamps. *IEEE*, 2012.
- [28] Energy Star. How do cfls work?
https://www.energystar.gov/index.cfm?c=cfls.pr_cfls_about
Hentet: 19.03.2015.
- [29] Neville R. Watson Tas Scott and Stephen Hirsch. Implications for distribution networks of high penetration of compact fluorescent lamps. *IEEE*, 2009.
- [30] Sankalp Rajeev Pampattiwar Victor George, Aayush Bagaria Prakash Singh and Swati Periwal. Comparison of cfl and led lamp - harmonic disturbances, economics (cost and power quality) and maximum possible loading in a power system. *IEEE*, 2012.
- [31] www.fluke.no. Produkter nettkvalitetsverktøy.<http://www.fluke.com/fluke/nono/products/Nettkvalitetsverkt\T1\oy.htm> Bilde hentet: 22.04.2015.
- [32] www.glamox.com. Brattørkaia 15 i trondheim.
<http://glamox.com/no/referen/brattoerkaia-15-i-trodheim>
Lest: 04.05.2015.
- [33] Øyvind Kjeldstad. *Dimensjonering av ledertversnitt i anlegg med overharmoniske strømmer*, 2010.

Vedlegg

Vedlegg A

Oversikt over måleinstrumenter

I tabellene under er det en liste over alle måleinstrumentene benyttet i laboratorieforsøkene og feltmålingene.

Måling av strøm og spenning (1-fase)	
Instrument	Effektanalysator
Fabrikat	Fluke
Modell	43
Serienummer	DM7360038
NTNU reg.nr.	H02-0110

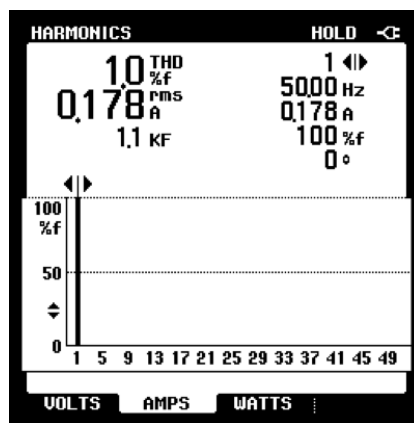
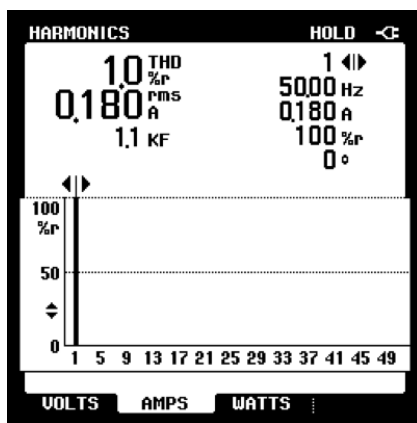
Måling av strøm og spenning (3-fase)	
Instrument	3-fase effektanalysator
Fabrikat	Fluke
Modell	434
Serienummer	DM8760042
NTNU reg.nr.	H02-0124

Strømtang til Fluke 43	
Instrument	Strømtang
Fabrikat	Fluke
Modell	80i-110s AC/DC Current Probe
Serienummer	-
NTNU reg.nr.	I04-0523

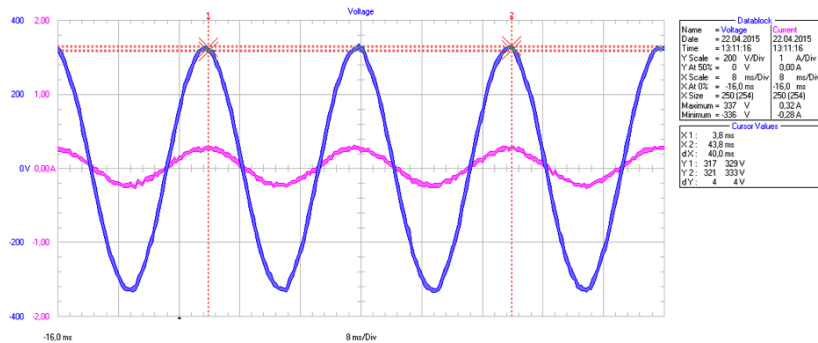
Strømtang til Fluke 434	
Instrument	Strømtang
Fabrikat	Fluke
Modell	i400s AC Current Clamp
Serienummer	-
NTNU reg.nr.	H02-0124-01

Vedlegg B

Måleresultater belysningskilder

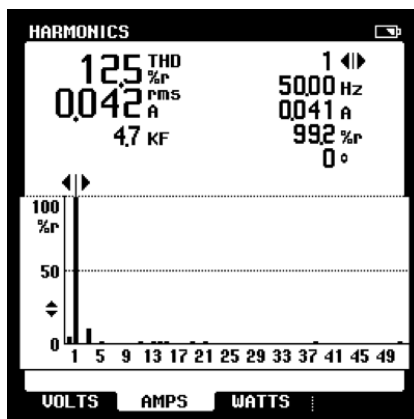
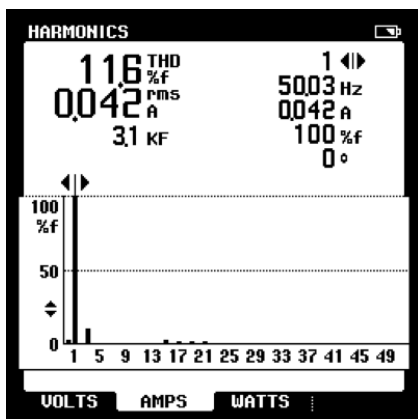


(a) Overharmonisk spektrum (%RMS) (b) Overharmonisk spektrum (%Fund).

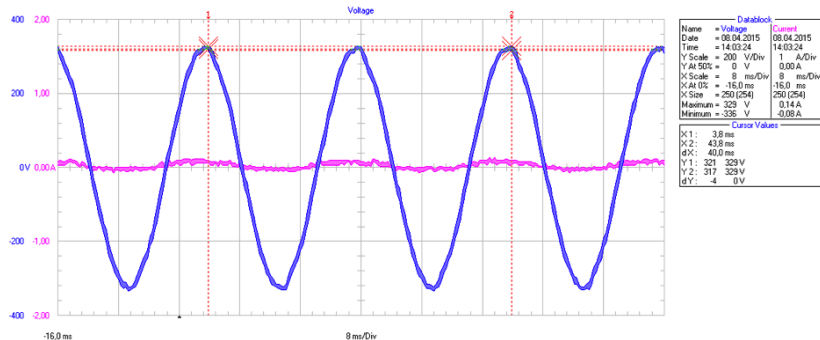


(c) Strøm- og spenningskurve.

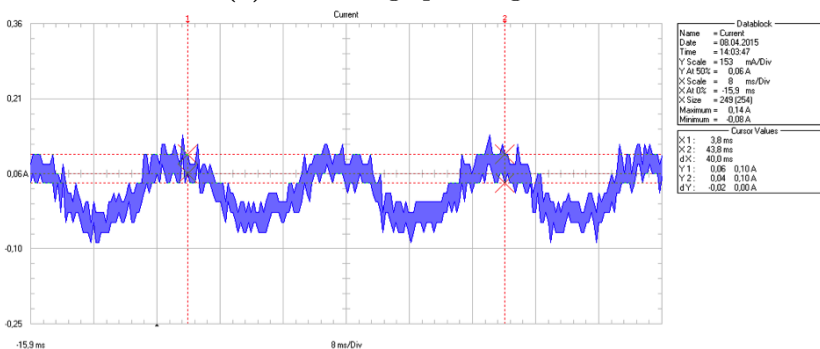
Figur B.1: Måleresultater test-ID: HALO E27 1



(a) Overharmonisk spektrum (%Fund). (b) Overharmonisk spektrum (%RMS).

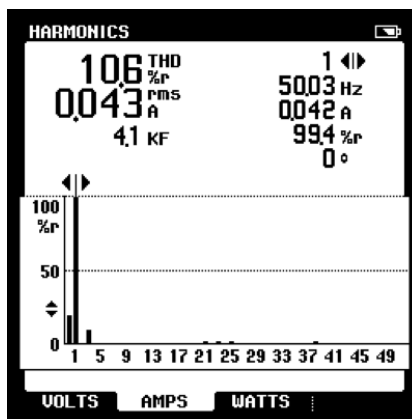
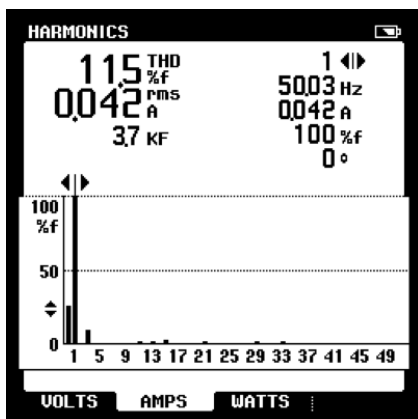


(c) Strøm- og spenningskurve.

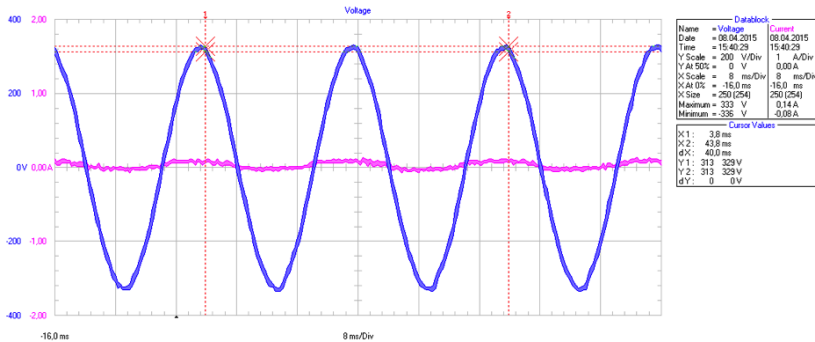


(d) Strømkurve.

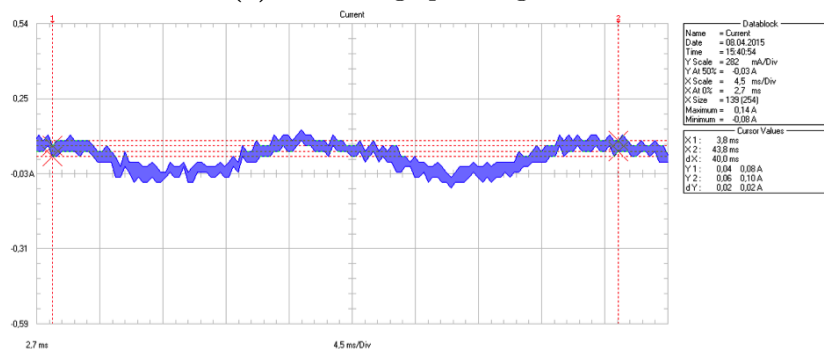
Figur B.2: Måleresultater test-ID: LED E27 1



(a) Overharmonisk spektrum (%Fund). (b) Overharmonisk spektrum (%RMS).

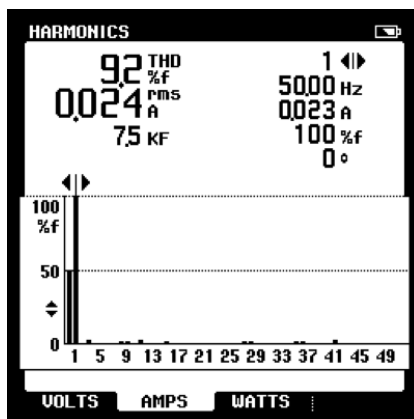
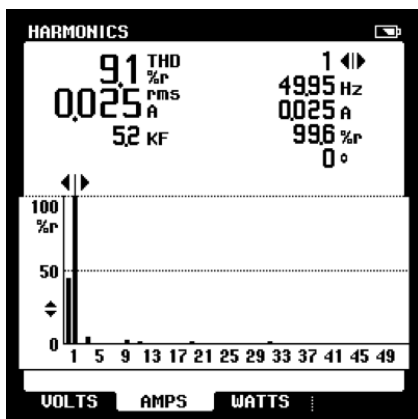


(c) Strøm- og spenningskurve.



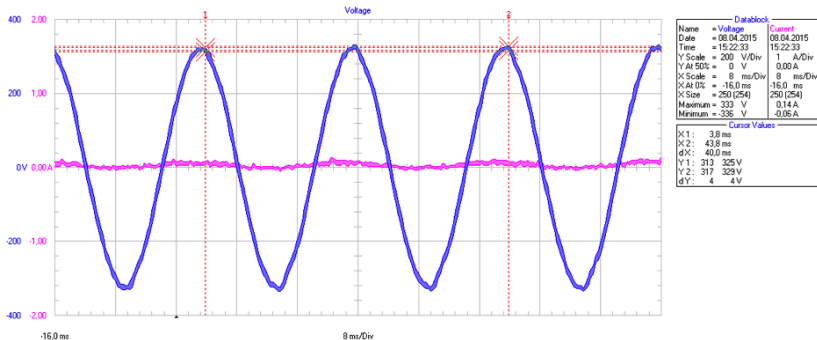
(d) Strømkurve.

Figur B.3: Måleresultater test-ID: LED E27 2

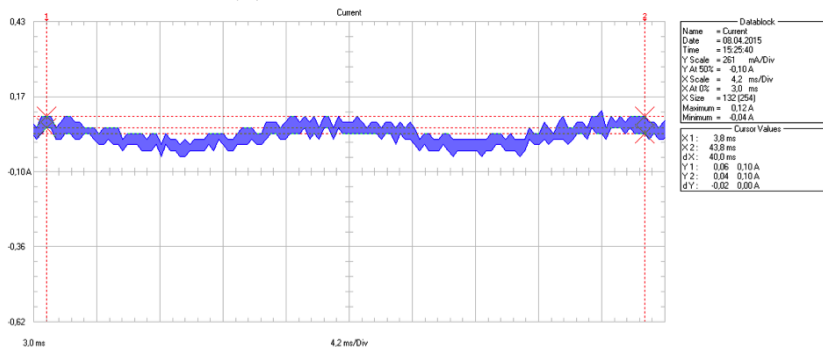


(a) Overharmonisk spektrum (%RMS).

(b) Overharmonisk spektrum (%Fund).

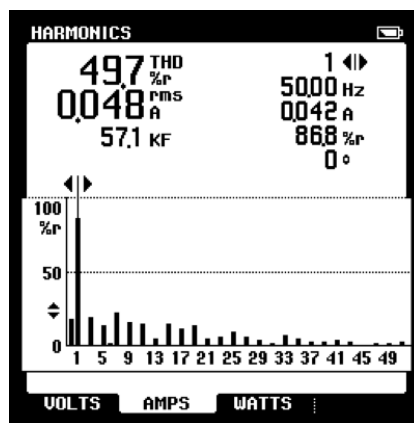
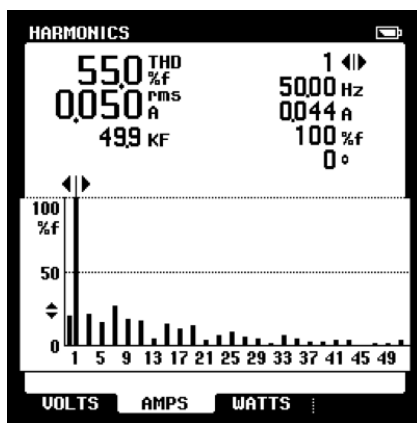


(c) Strøm- og spenningskurve.

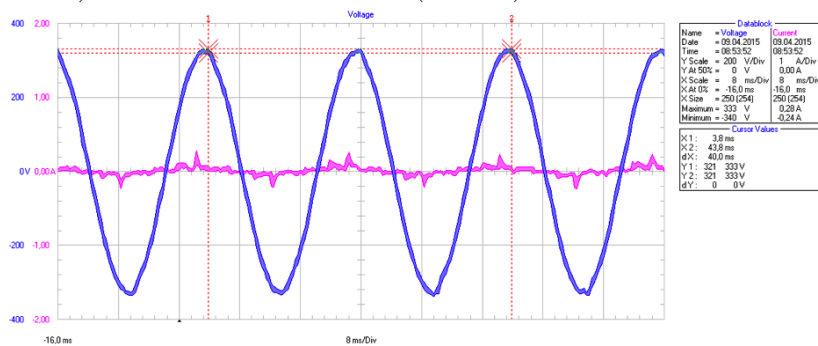


(d) Strømkurve.

Figur B.4: Måleresultater test-ID: LED E27 3

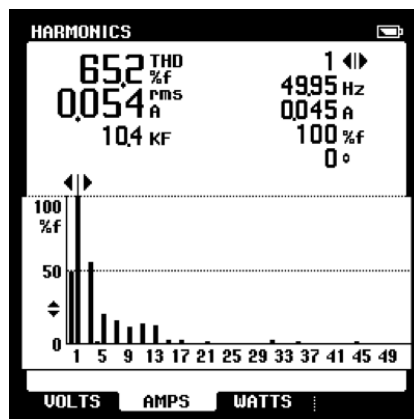
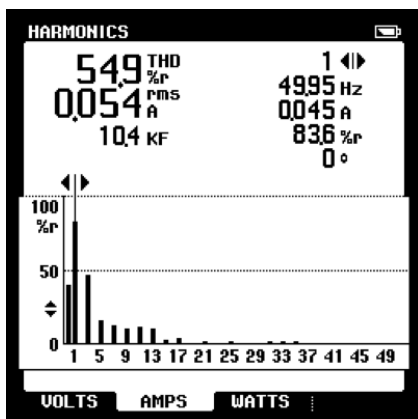


(a) Overharmonisk spektrum (%Fund). (b) Overharmonisk spektrum (%RMS).

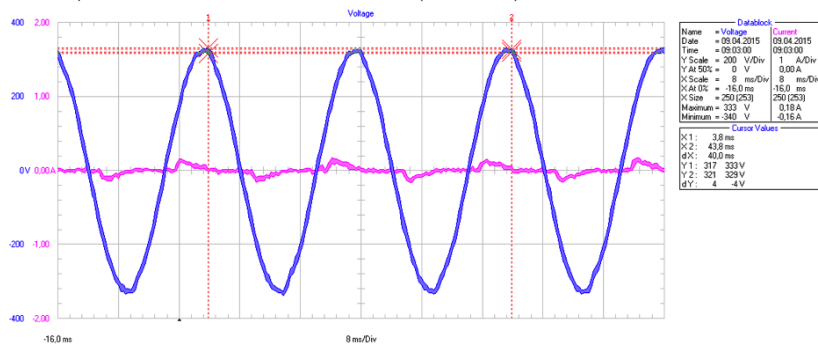


(c) Strøm- og spenningskurve.

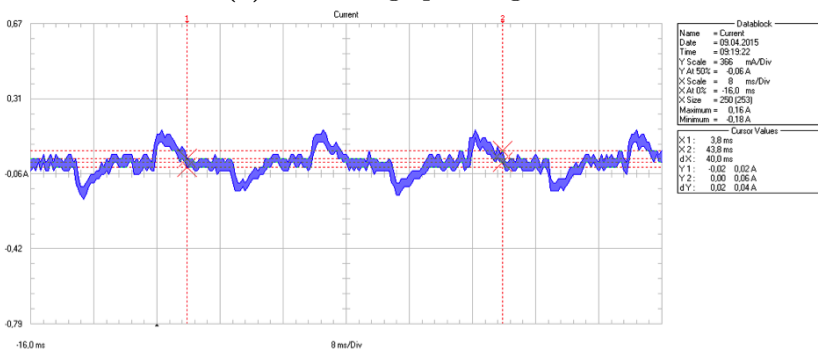
Figur B.5: Måleresultater test-ID: LED E27 4



(a) Overharmonisk spektrum (%RMS). (b) Overharmonisk spektrum (%Fund).

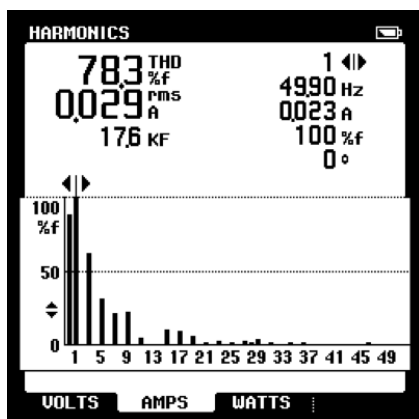


(c) Strøm- og spenningskurve.

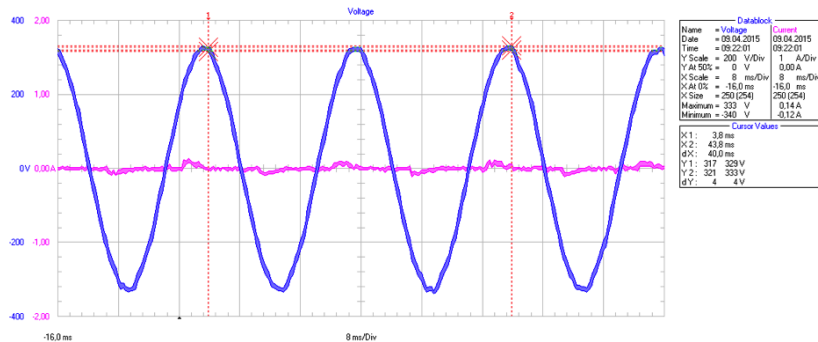


(d) Strømkurve.

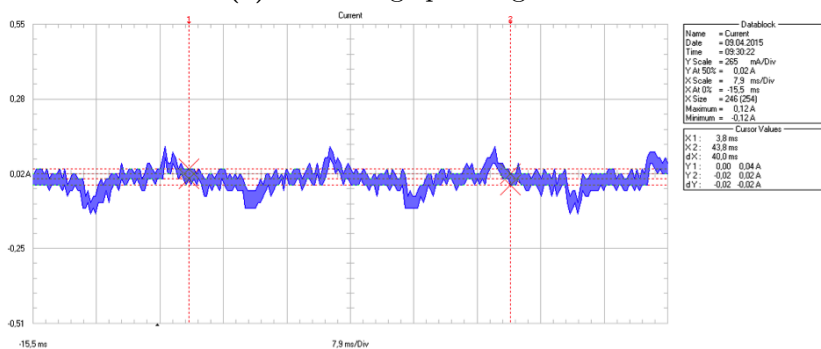
Figur B.6: Måleresultater test-ID: LED E27 5



(a) Overharmonisk spektrum (%Fund). (b) Overharmonisk spektrum (%RMS).

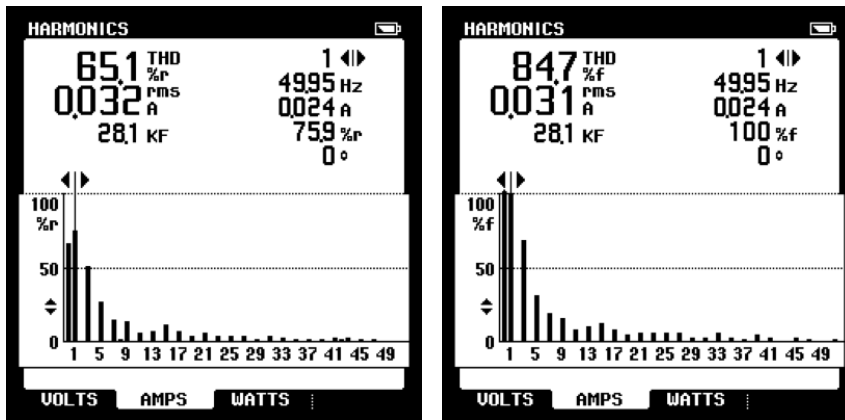


(c) Strøm- og spenningskurve.

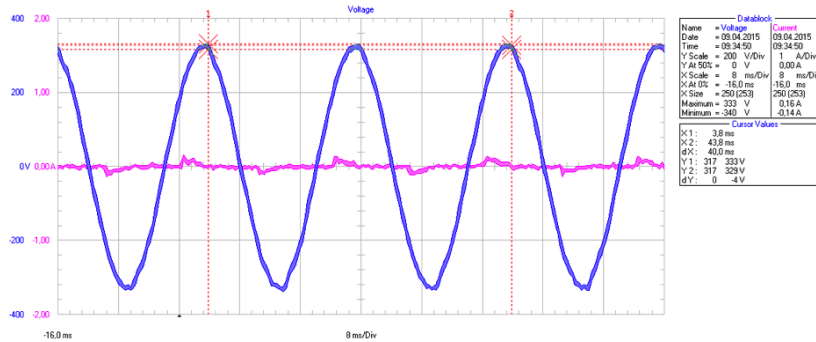


(d) Strømkurve.

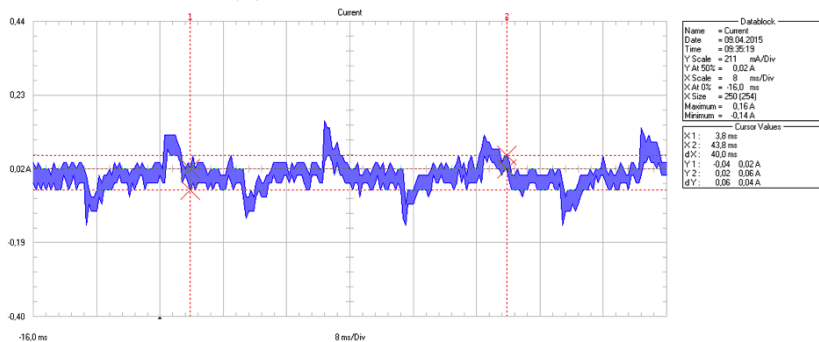
Figur B.7: Måleresultater test-ID: LED E14 1



(a) Overharmonisk spektrum (%RMS). (b) Overharmonisk spektrum (%Fund).

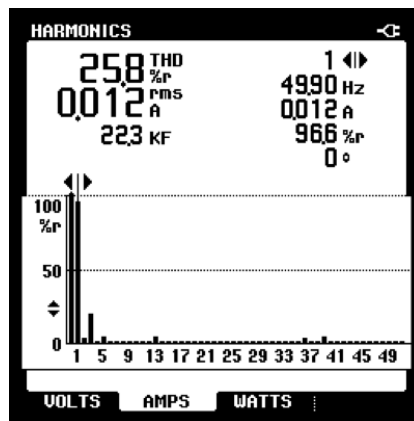
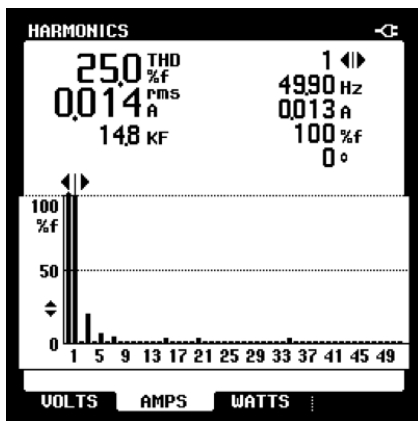


(c) Strøm- og spenningskurve.

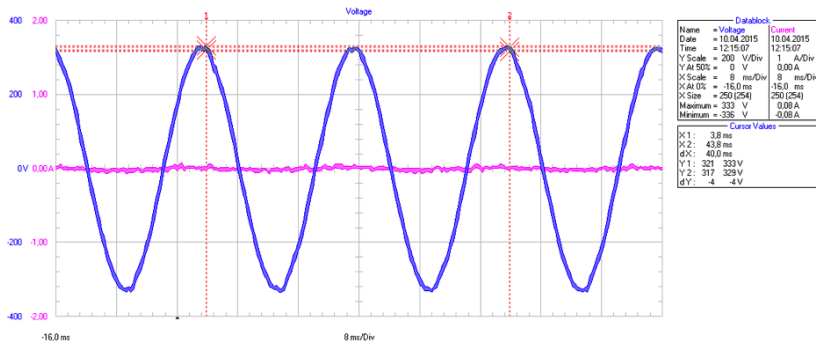


(d) Strømkurve.

Figur B.8: Måleresultater test-ID: LED E14 2

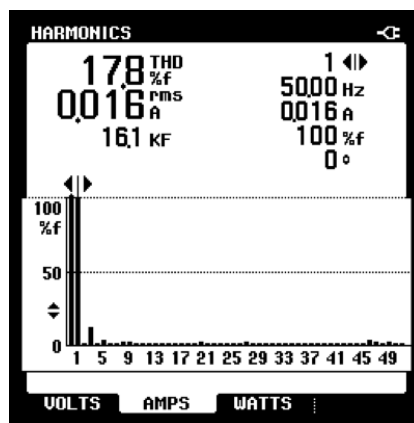
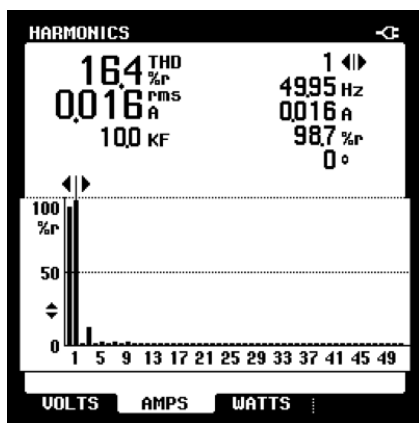


(a) Overharmonisk spektrum (%RMS). (b) Overharmonisk spektrum (%Fund).

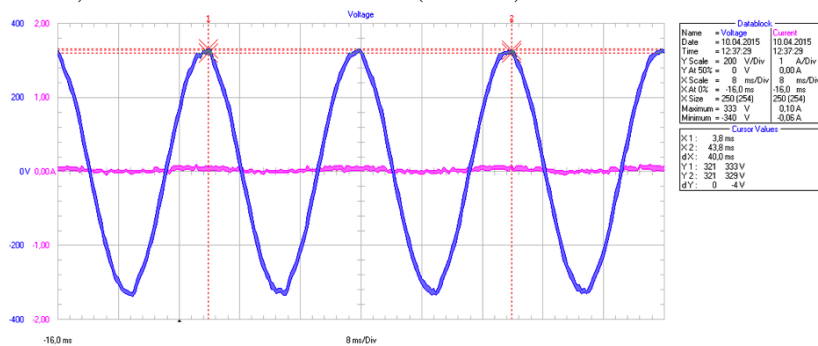


(c) Strøm- og spenningskurve.

Figur B.9: Måleresultater test-ID: LED GU10 1

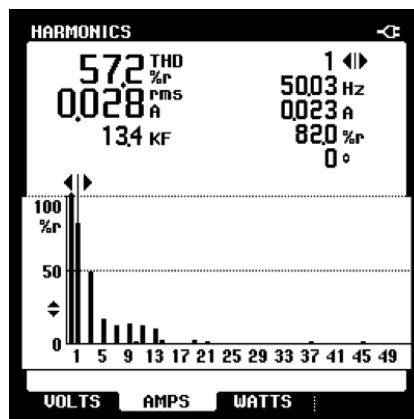
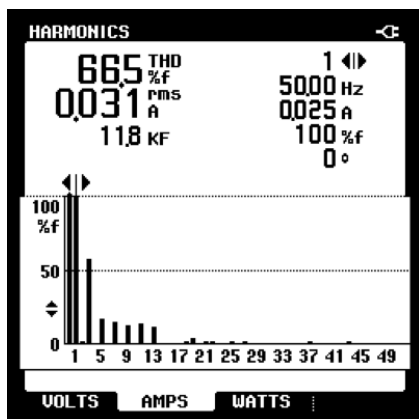


(a) Overharmonisk spektrum (%RMS) (b) Overharmonisk spektrum (%Fund).

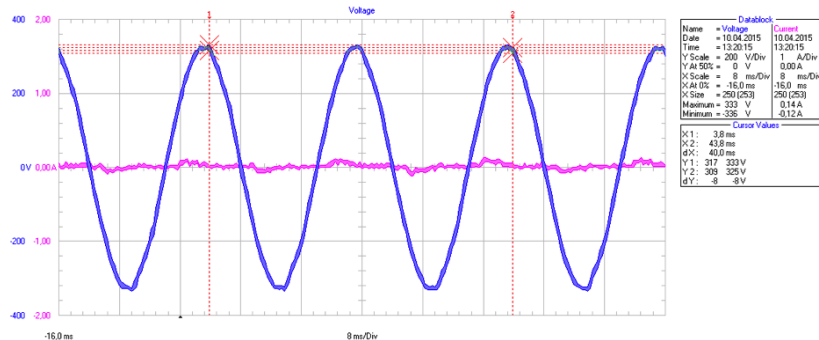


(c) Strøm- og spenningskurve.

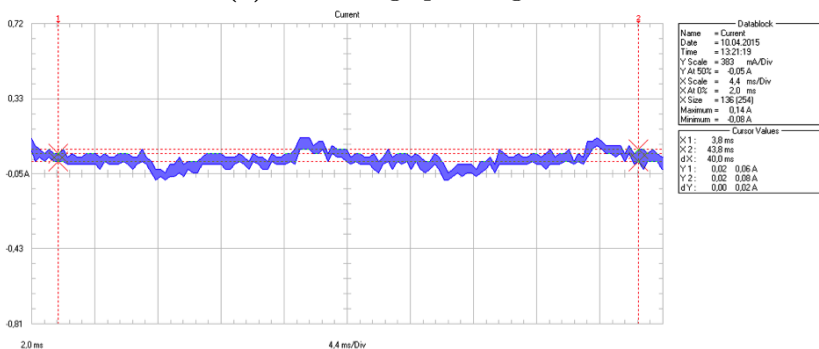
Figur B.10: Måleresultater test-ID: LED GU10 2



(a) Overharmonisk spektrum (%Fund). (b) Overharmonisk spektrum (%RMS).

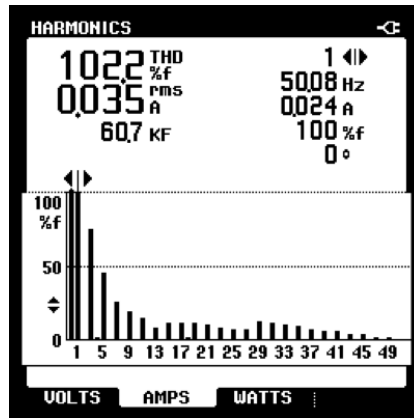
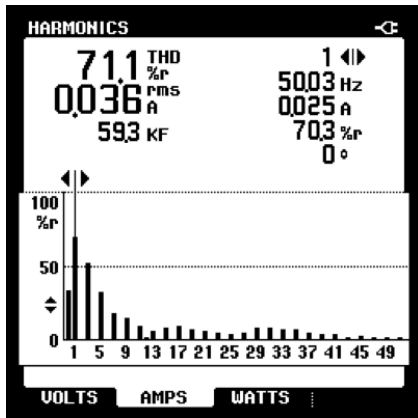


(c) Strøm- og spenningskurve.

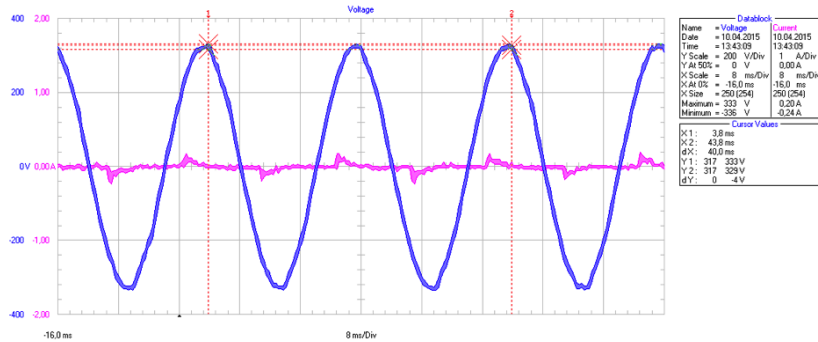


(d) Strømkurve.

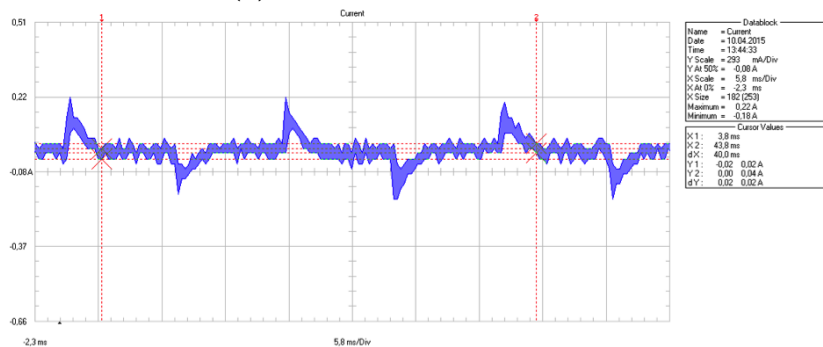
Figur B.11: Måleresultater test-ID: LED GU10 3



(a) Overharmonisk spektrum (%RMS). (b) Overharmonisk spektrum (%Fund).

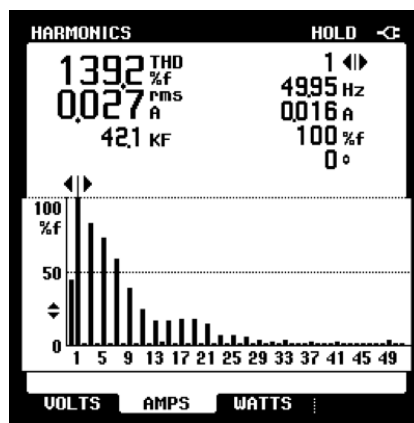
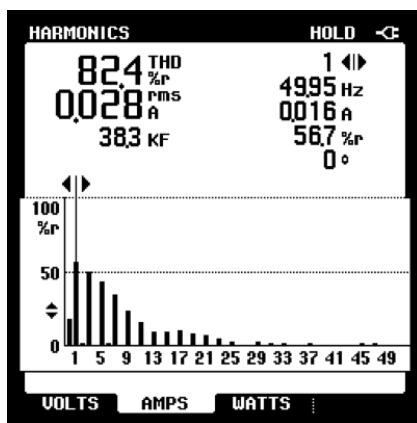


(c) Strøm- og spenningskurve.

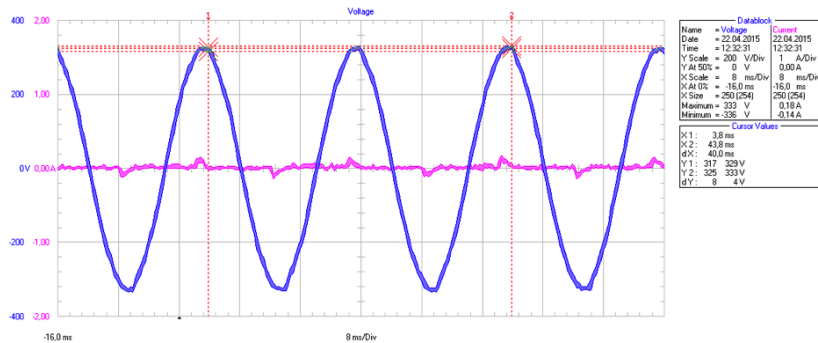


(d) Strømkurve.

Figur B.12: Måleresultater test-ID: LED GU10 4

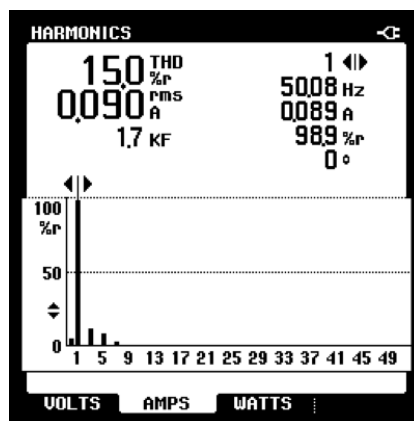
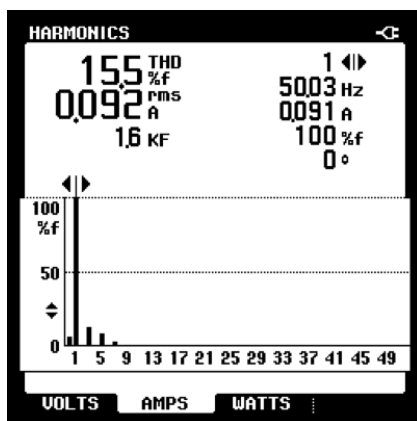


(a) Overharmonisk spektrum (%RMS) (b) Overharmonisk spektrum (%Fund).

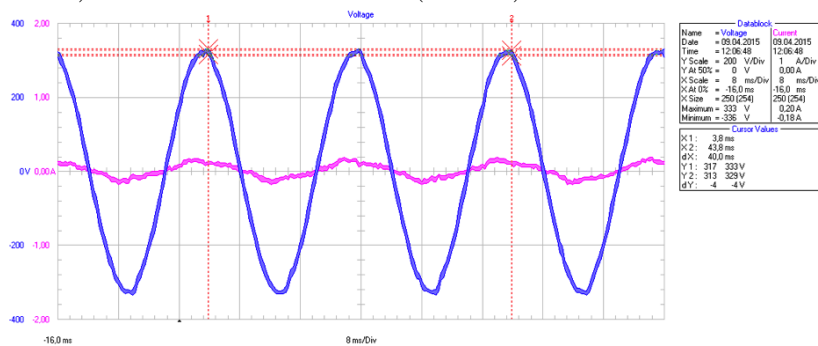


(c) Strøm- og spenningskurve.

Figur B.13: Måleresultater test-ID: LED GU10 5

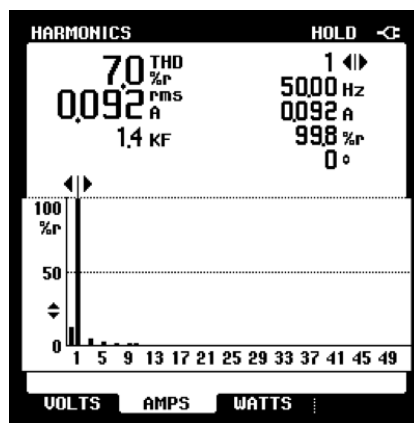
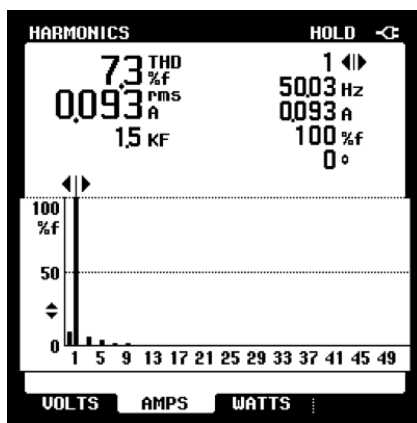


(a) Overharmonisk spektrum (%Fund). (b) Overharmonisk spektrum (%RMS).

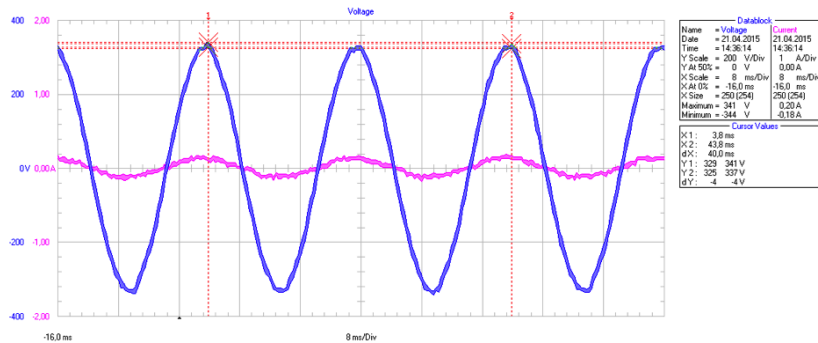


(c) Strøm- og spenningskurve.

Figur B.14: Måleresultater test-ID: LED ST8 1

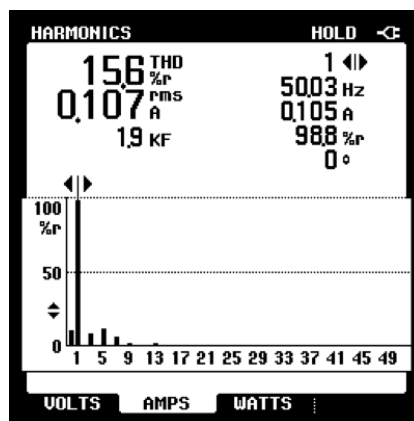
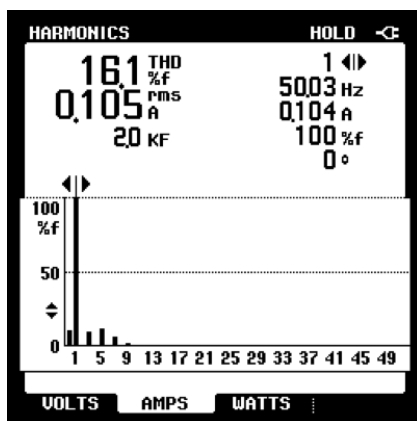


(a) Overharmonisk spektrum (%Fund). (b) Overharmonisk spektrum (%RMS).

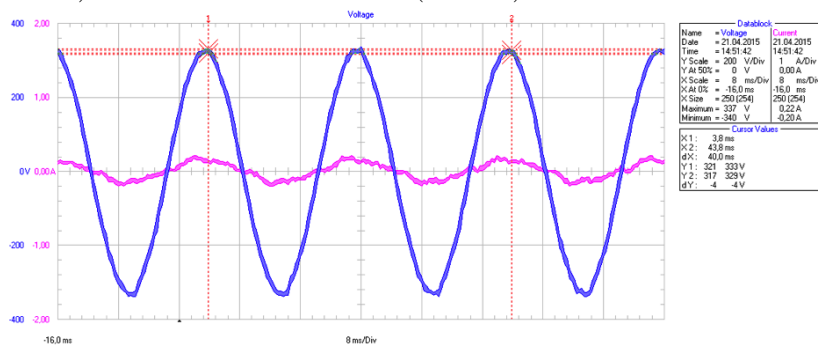


(c) Strøm- og spenningskurve.

Figur B.15: Måleresultater test-ID: LED ST8 2

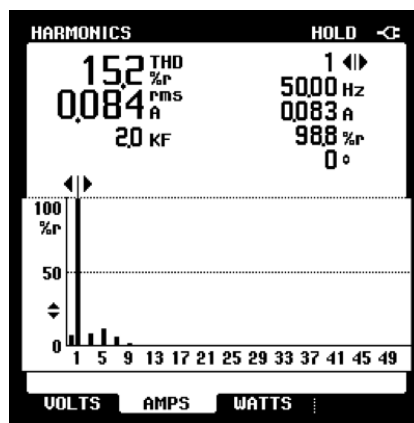
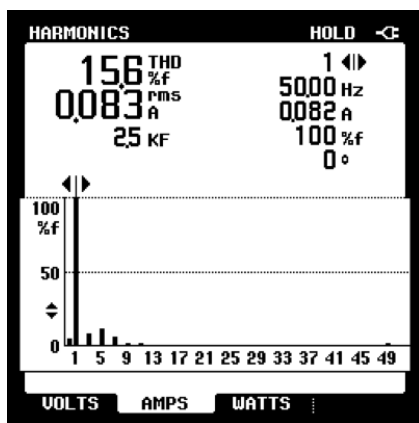


(a) Overharmonisk spektrum (%Fund). (b) Overharmonisk spektrum (%RMS).

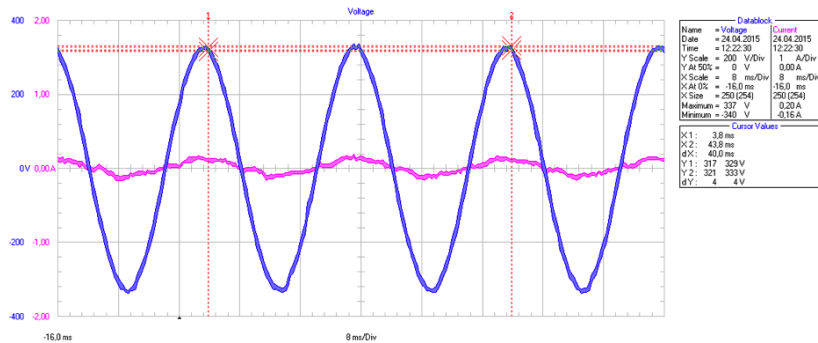


(c) Strøm- og spenningskurve.

Figur B.16: Måleresultater test-ID: LED ST8 3

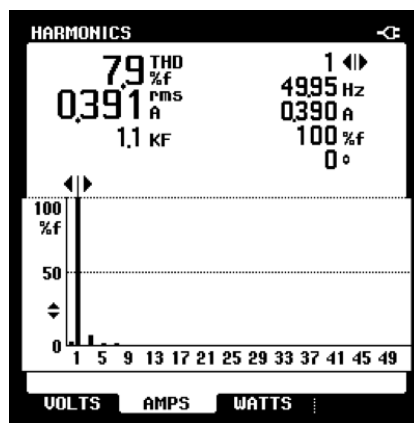
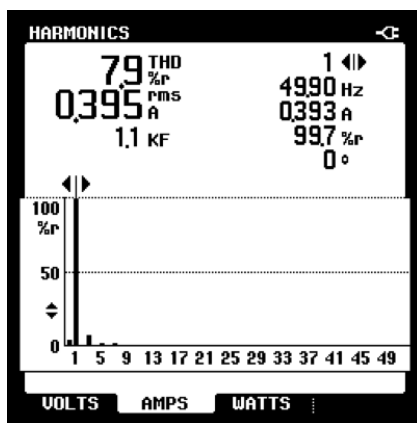


(a) Overharmonisk spektrum (%Fund). (b) Overharmonisk spektrum (%RMS).

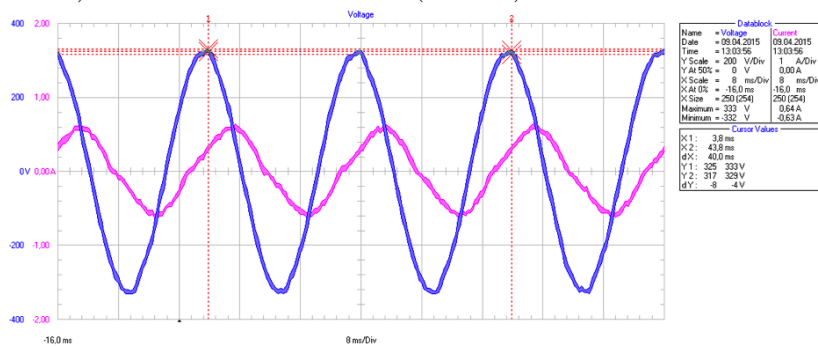


(c) Strøm- og spenningskurve.

Figur B.17: Måleresultater test-ID: LED ST8 4

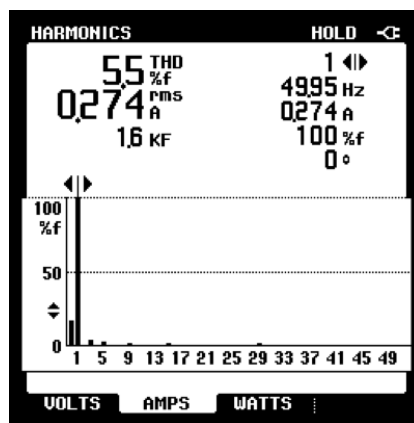
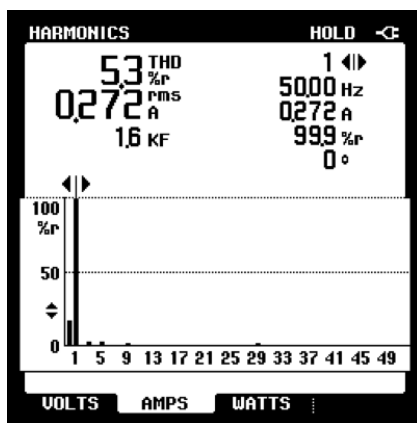


(a) Overharmonisk spektrum (%RMS) (b) Overharmonisk spektrum (%Fund).

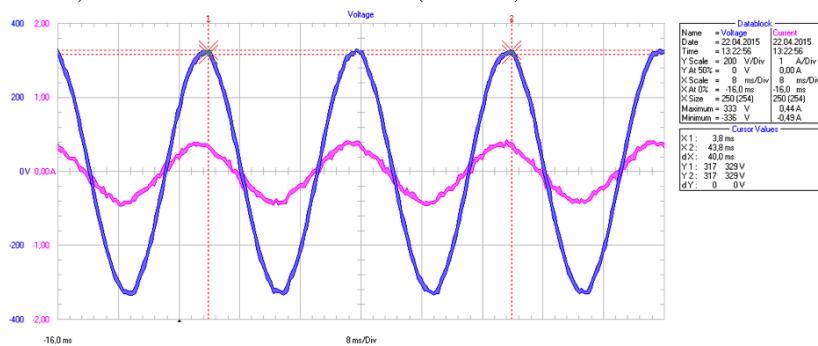


(c) Strøm- og spenningskurve.

Figur B.18: Måleresultater test-ID: FL T8 1

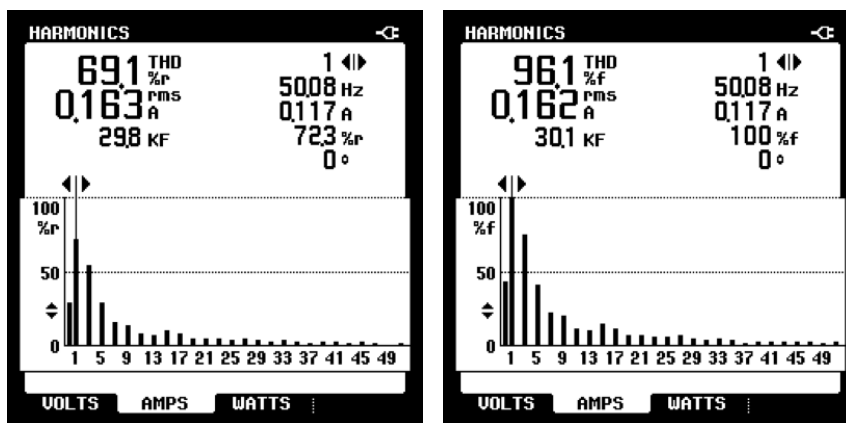


(a) Overharmonisk spektrum (%RMS). (b) Overharmonisk spektrum (%Fund).

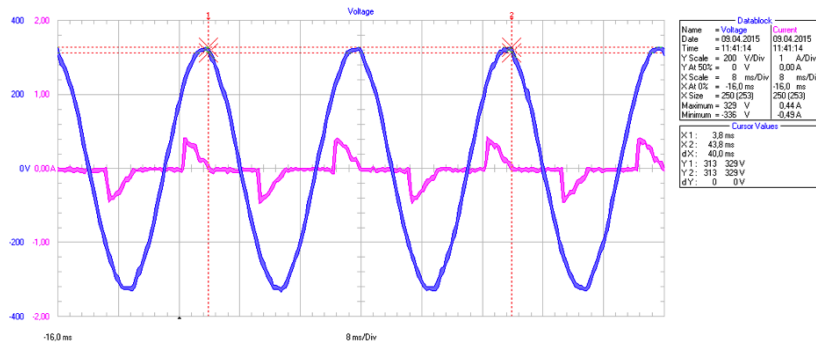


(c) Strøm- og spenningskurve.

Figur B.19: Måleresultater test-ID: FL T5 1

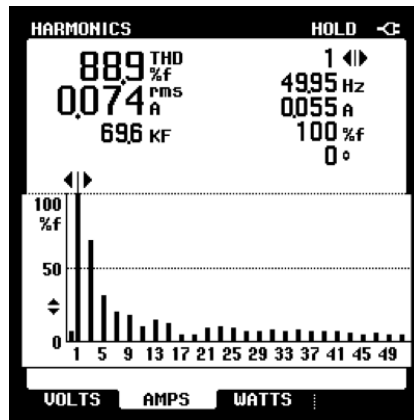
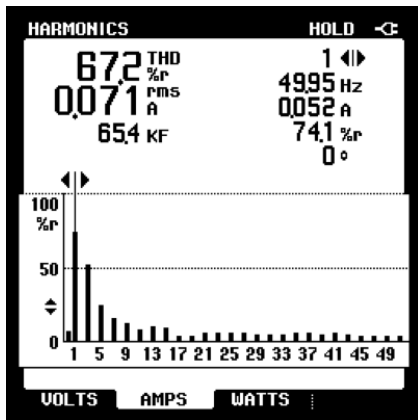


(a) Overharmonisk spektrum (%RMS). (b) Overharmonisk spektrum (%Fund).

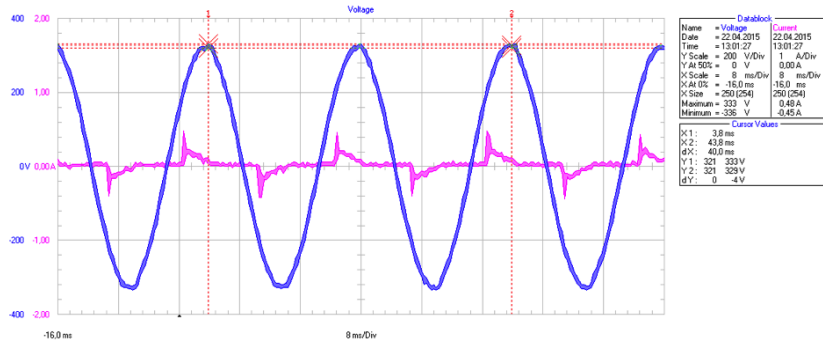


(c) Strøm- og spenningskurve.

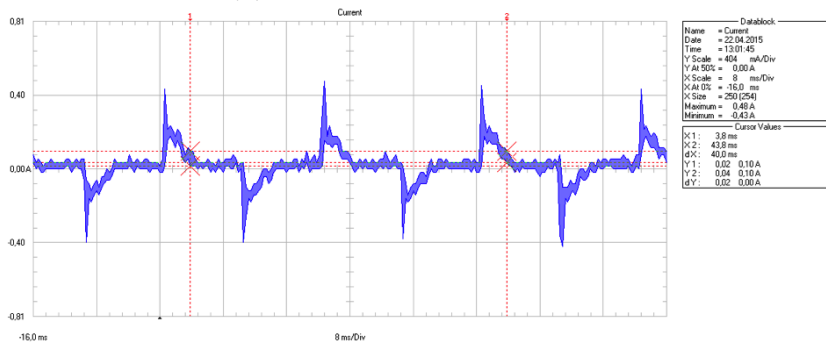
Figur B.20: Måleresultater test-ID: CFL E27 1



(a) Overharmonisk spektrum (%RMS). (b) Overharmonisk spektrum (%Fund).

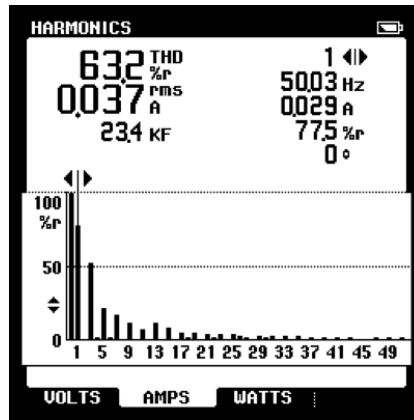
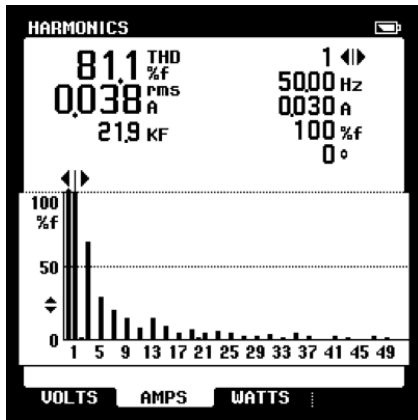


(c) Strøm- og spenningskurve.

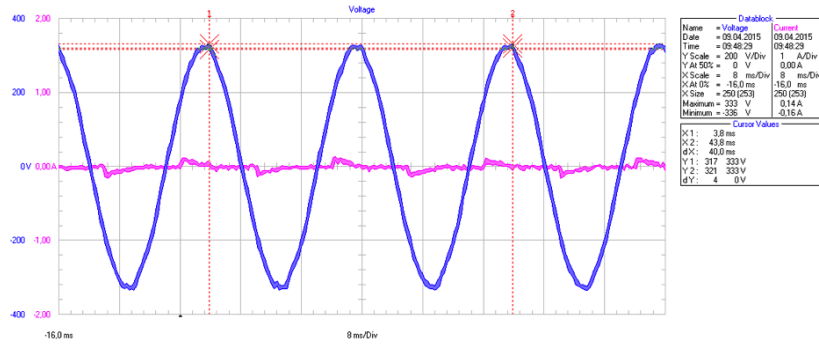


(d) Strømkurve.

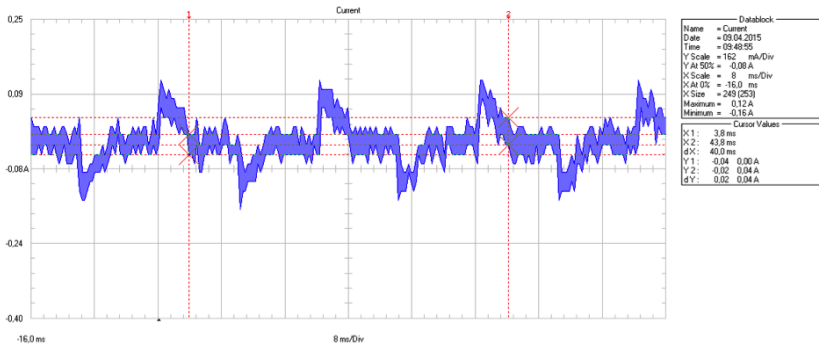
Figur B.21: Måleresultater test-ID: CFL E27 2



(a) Overharmonisk spektrum (%Fund). (b) Overharmonisk spektrum (%RMS).

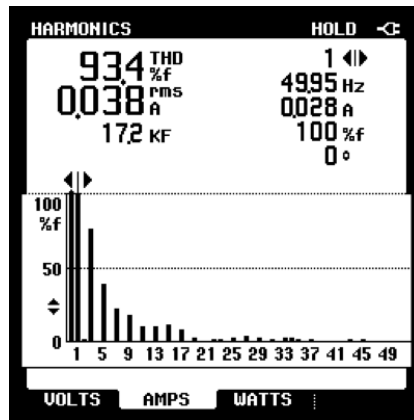
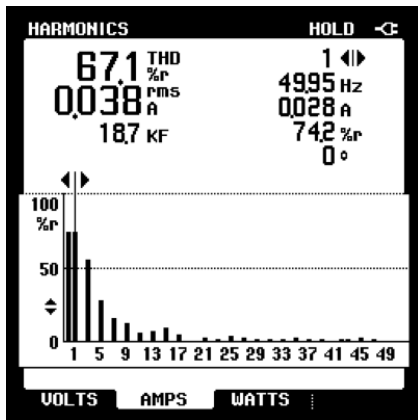


(c) Strøm- og spenningskurve.

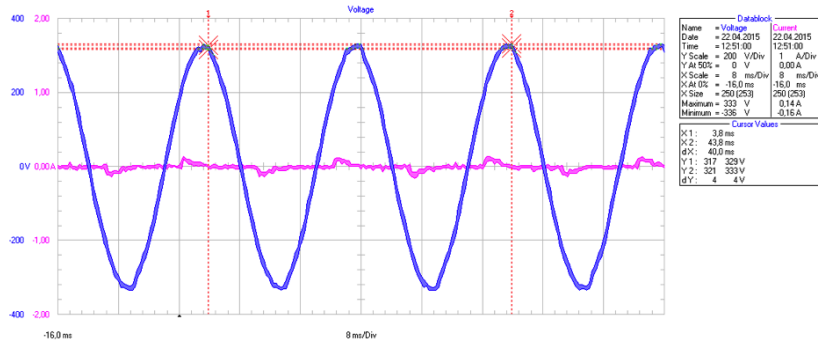


(d) Strømkurve.

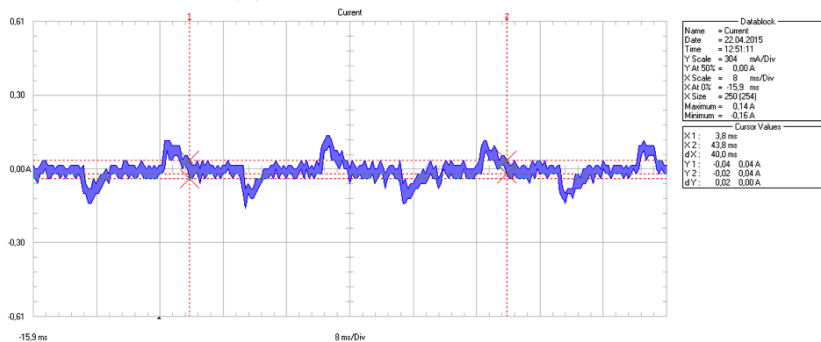
Figur B.22: Måleresultater test-ID: CFL E14 1



(a) Overharmonisk spektrum (%RMS). (b) Overharmonisk spektrum (%Fund).



(c) Strøm- og spenningskurve.

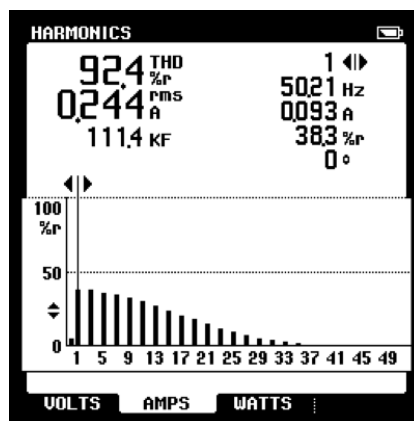
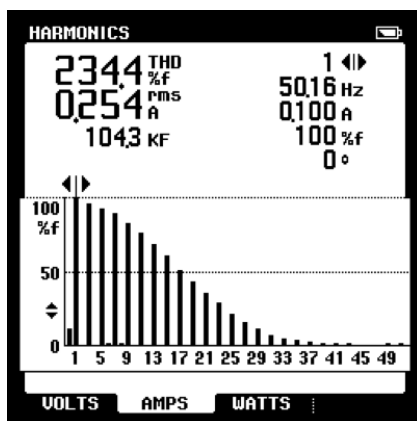


(d) Strømkurve.

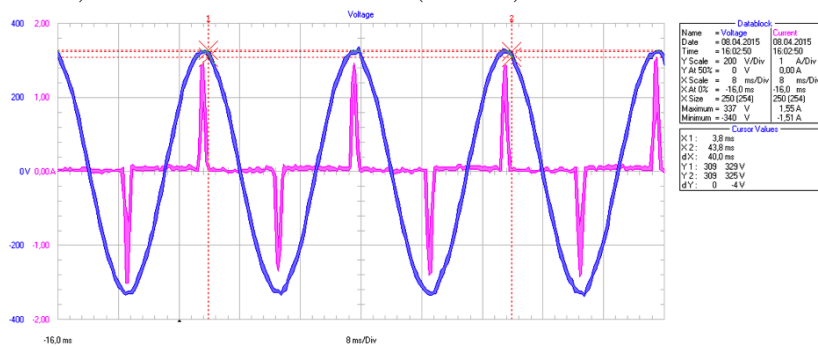
Figur B.23: Måleresultater test-ID: CFL E14 2

Vedlegg C

Måleresultater bærbare datamaskiner

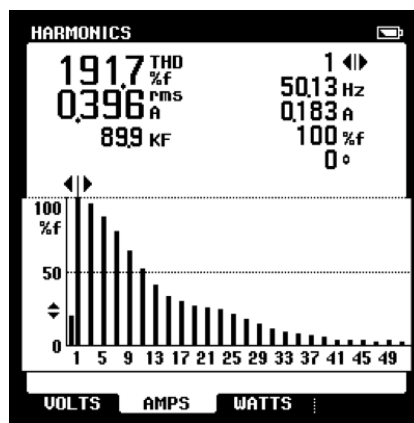
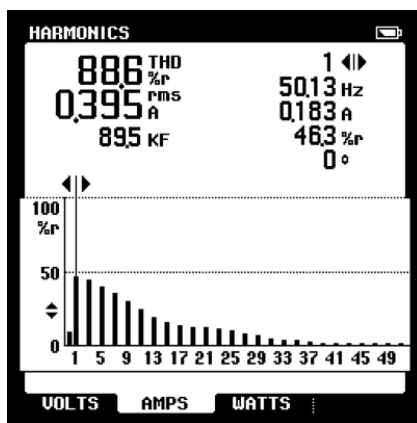


(a) Overharmonisk spektrum (%Fund). (b) Overharmonisk spektrum (%RMS).

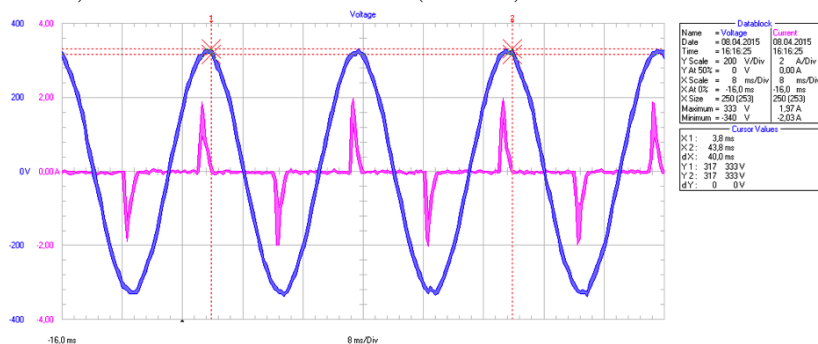


(c) Strøm- og spenningskurve.

Figur C.1: Måleresultater test-ID: PC 1

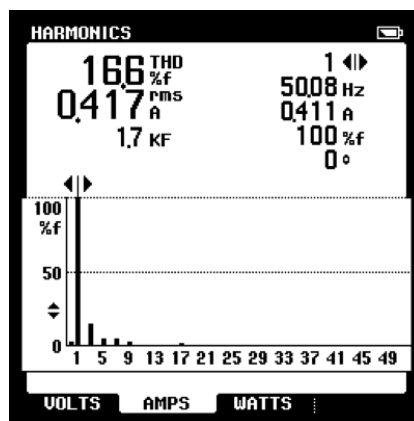
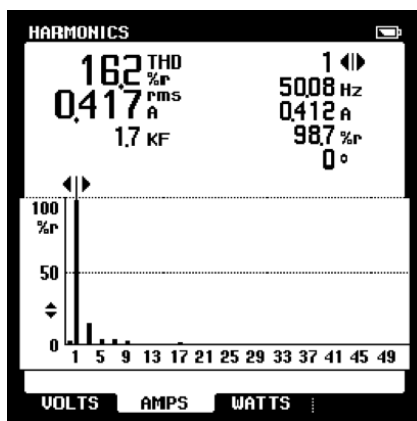


(a) Overharmonisk spektrum (%RMS). (b) Overharmonisk spektrum (%Fund).

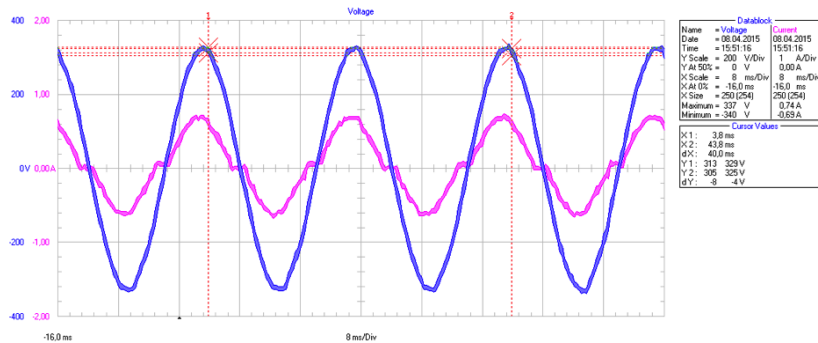


(c) Strøm- og spenningskurve.

Figur C.2: Måleresultater test-ID: PC 2

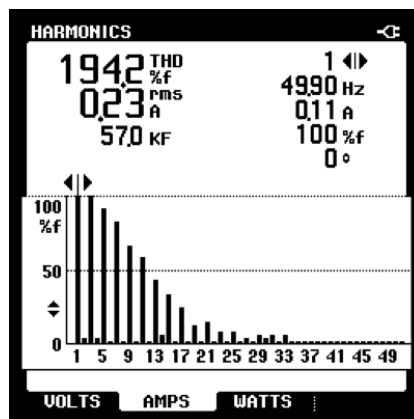
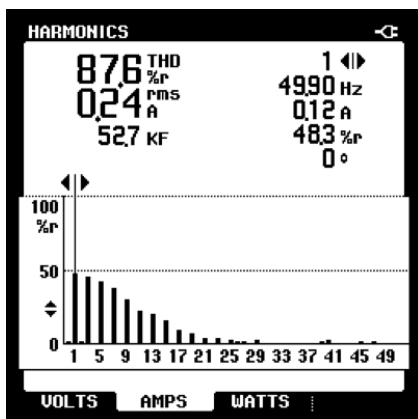


(a) Overharmonisk spektrum (%RMS) (b) Overharmonisk spektrum (%Fund).

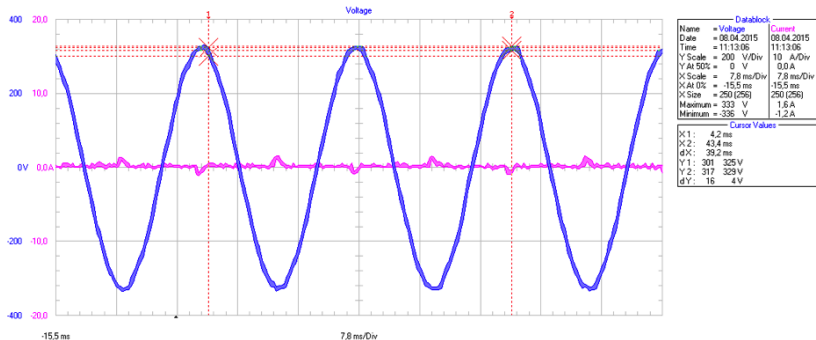


(c) Strøm- og spenningskurve.

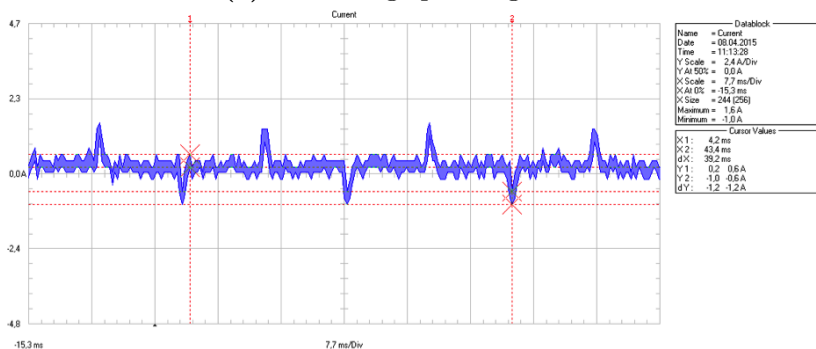
Figur C.3: Måleresultater test-ID: PC 3



(a) Overharmonisk spektrum (%RMS). (b) Overharmonisk spektrum (%Fund).

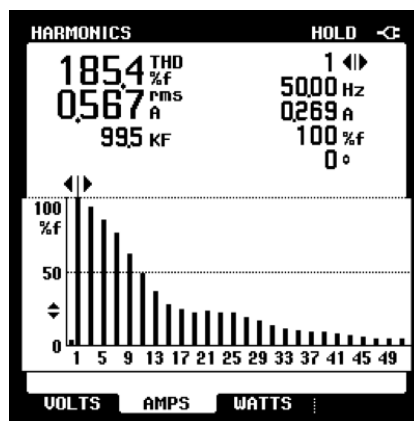
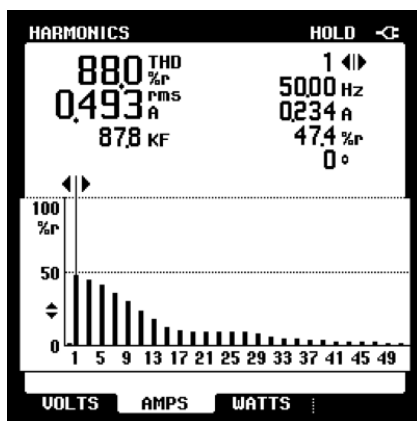


(c) Strøm- og spenningskurve.

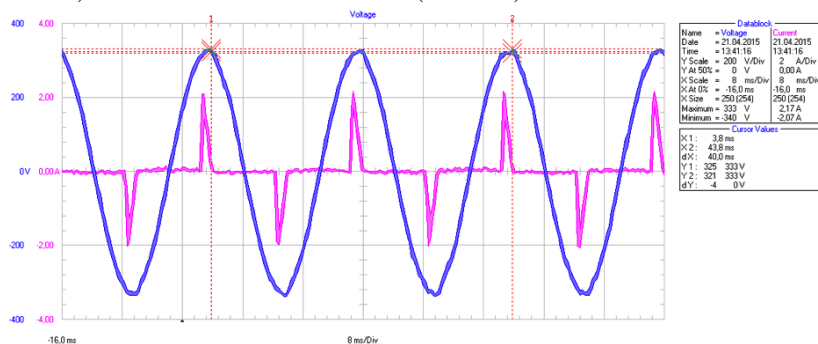


(d) Strømkurve.

Figur C.4: Måleresultater test-ID: PC 4

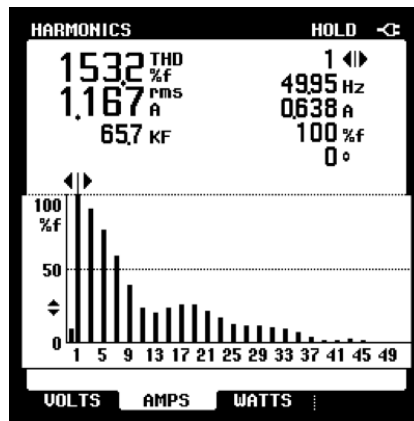
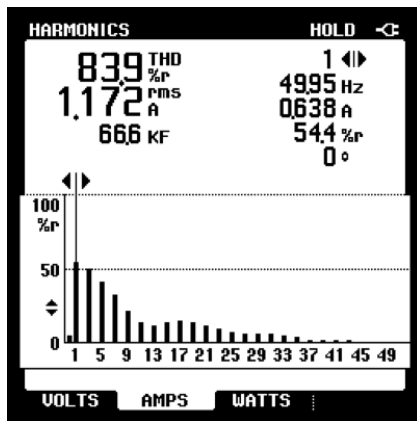


(a) Overharmonisk spektrum (%RMS) (b) Overharmonisk spektrum (%Fund).

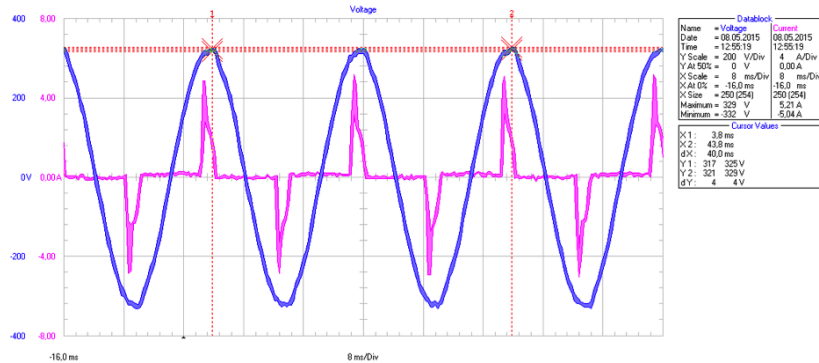


(c) Strøm- og spenningskurve.

Figur C.5: Måleresultater test-ID: PC 5

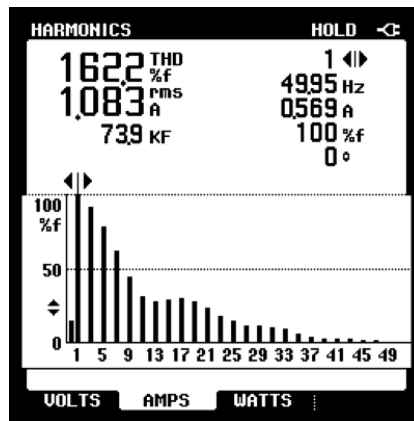
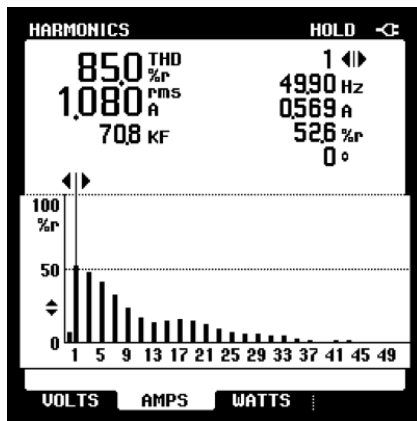


(a) Overharmonisk spektrum (%RMS) (b) Overharmonisk spektrum (%Fund).

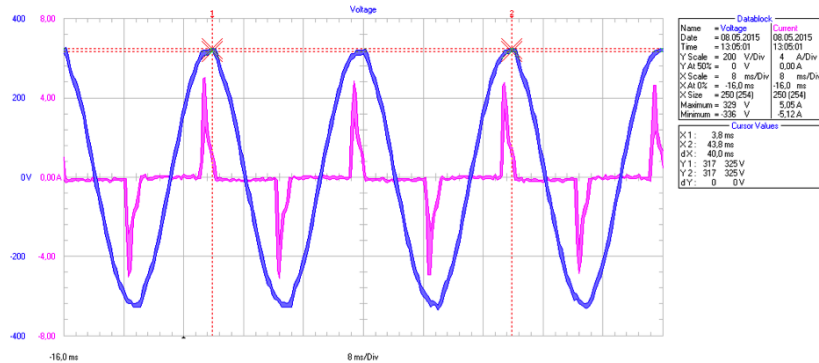


(c) Strøm- og spenningskurve.

Figur C.6: Måleresultater test-ID: 4 stk. PC 2

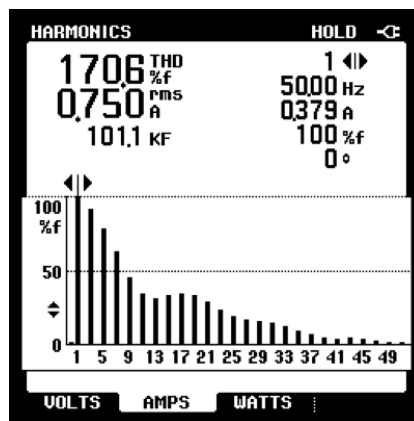
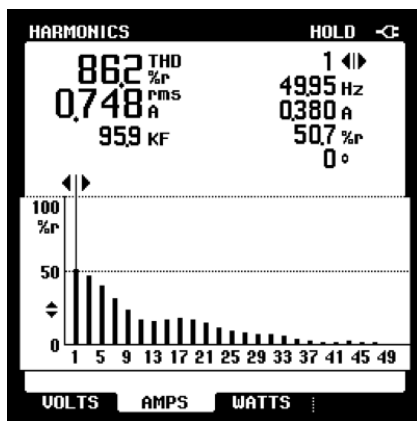


(a) Overharmonisk spektrum (%RMS). (b) Overharmonisk spektrum (%Fund).

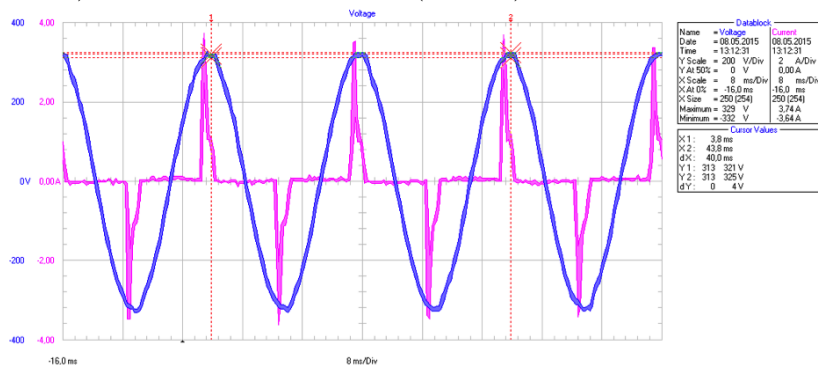


(c) Strøm- og spenningskurve.

Figur C.7: Måleresultater test-ID: 3 stk. PC 2



(a) Overharmonisk spektrum (%RMS) (b) Overharmonisk spektrum (%Fund).

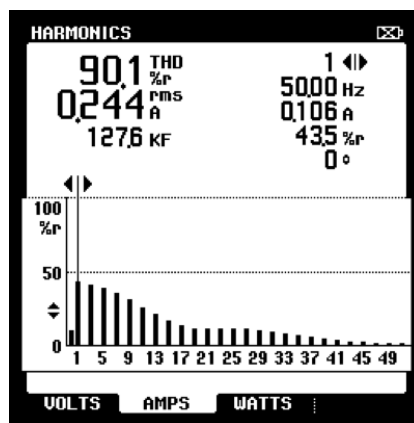
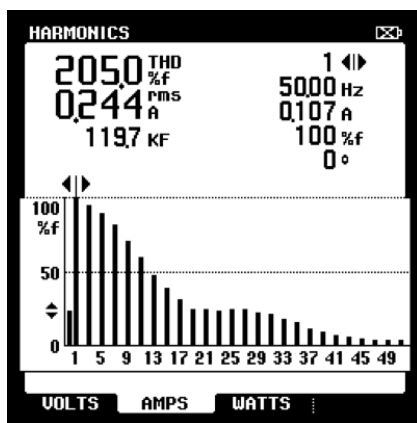


(c) Strøm- og spenningskurve.

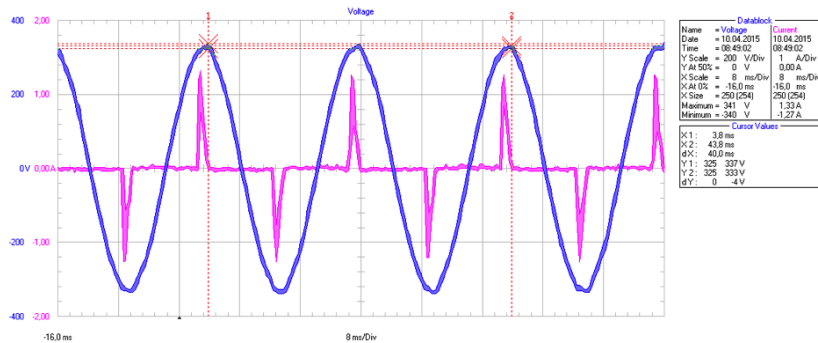
Figur C.8: Måleresultater test-ID: 2 stk. PC 2

Vedlegg D

Måleresultater PC-monitorer

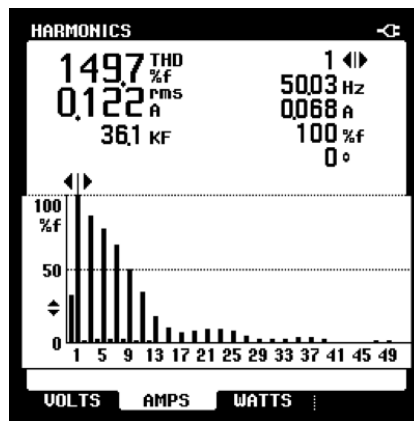
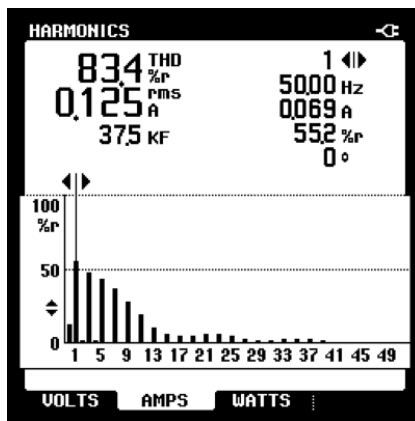


(a) Overharmonisk spektrum (%Fund). (b) Overharmonisk spektrum (%RMS).

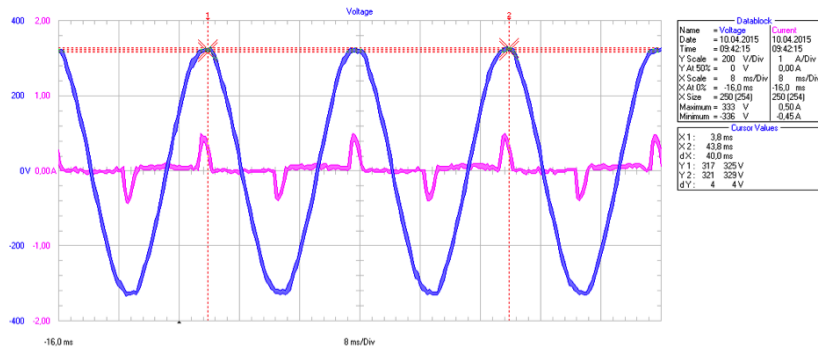


(c) Strøm- og spenningskurve.

Figur D.1: Måleresultater test-ID: PC mon 1

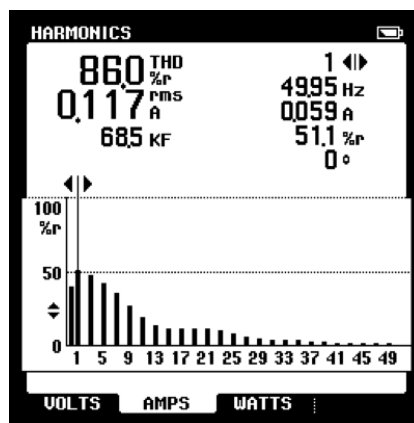
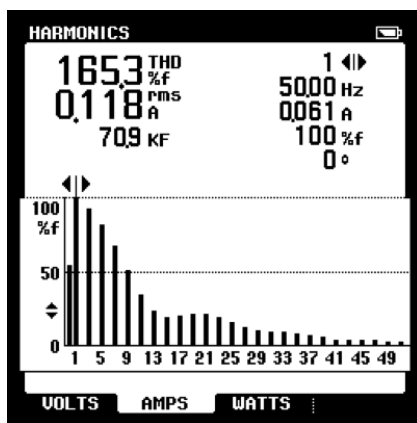


(a) Overharmonisk spektrum (%RMS) (b) Overharmonisk spektrum (%Fund).

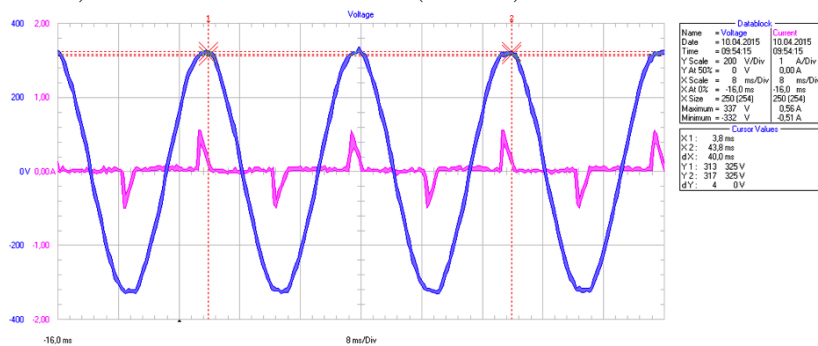


(c) Strøm- og spenningskurve.

Figur D.2: Måleresultater test-ID: PC mon 2

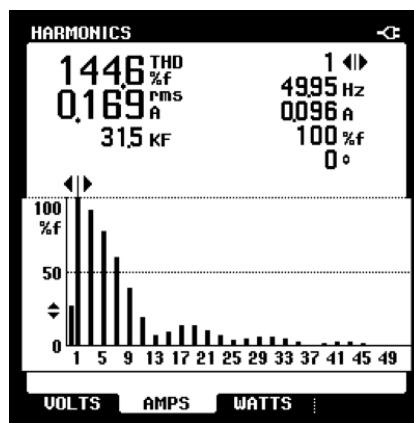
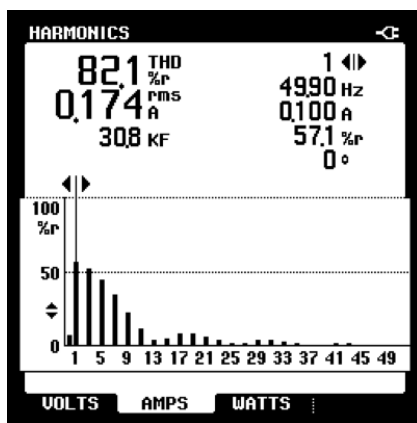


(a) Overharmonisk spektrum (%Fund). (b) Overharmonisk spektrum (%RMS).

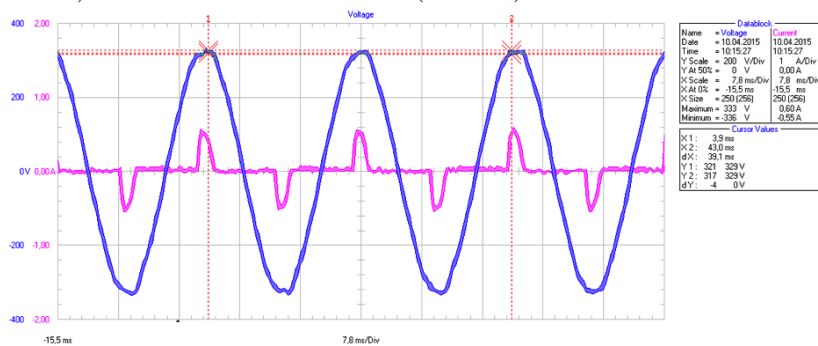


(c) Strøm- og spenningskurve.

Figur D.3: Måleresultater test-ID: PC mon 3



(a) Overharmonisk spektrum (%RMS) (b) Overharmonisk spektrum (%Fund).

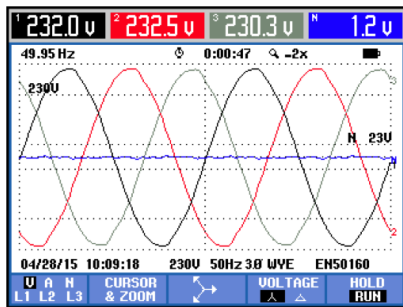


(c) Strøm- og spenningskurve.

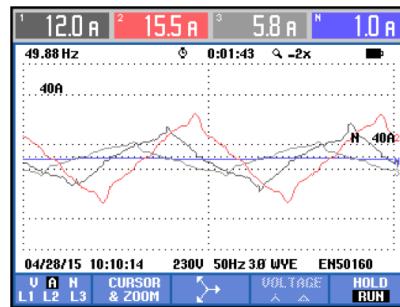
Figur D.4: Måleresultater test-ID: PC mon 4

Vedlegg E

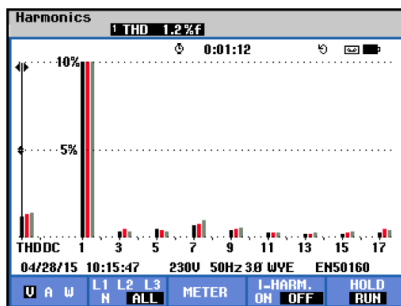
Måleresultater Elektrobygget, NTNU Gløshaugen



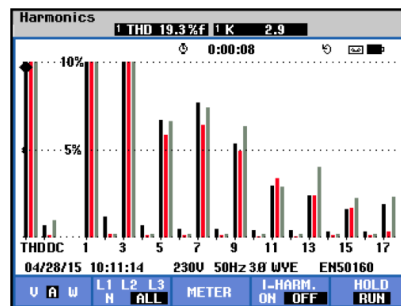
(a) Spenningskurver.



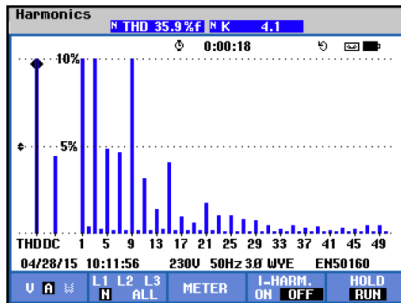
(b) Strømkurver.



(c) Overharmonisk spektrum, spenning.



(d) Overharmonisk spektrum, strøm.



(e) Overharmonisk spektrum N- leder, strøm.

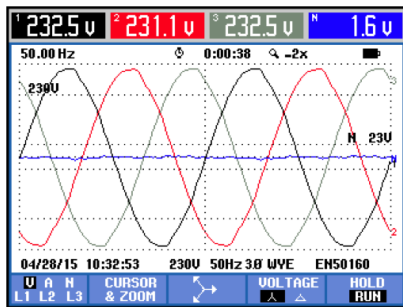
HARMONICS TABLE				
Voit	L1	L2	L3	N
THD%f	1.2	1.3	1.4	399.9
H3%f	0.4	0.5	0.4	220.0
H5%f	0.4	0.4	0.3	18.3
H7%f	0.7	0.8	1.0	58.2
H9%f	0.4	0.5	0.6	261.9
H11%f	0.2	0.3	0.3	36.2
H13%f	0.2	0.2	0.3	43.0
H15%f	0.2	0.3	0.3	128.9

(f) Overharmonisk tabell, spenning.

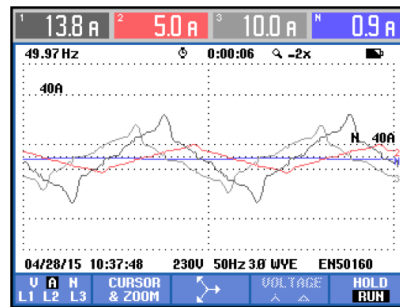
HARMONICS TABLE				
Amp	L1	L2	L3	N
THD%f	20.7	15.4	18.7	44.3
H3%f	15.8	10.8	12.7	39.2
H5%f	6.9	5.8	6.7	5.9
H7%f	8.0	6.3	7.4	6.1
H9%f	5.8	4.9	6.4	16.8
H11%f	3.1	3.4	2.9	3.9
H13%f	2.6	2.4	4.0	2.2
H15%f	1.7	1.7	2.3	5.6

(g) Overharmonisk tabell, strøm.

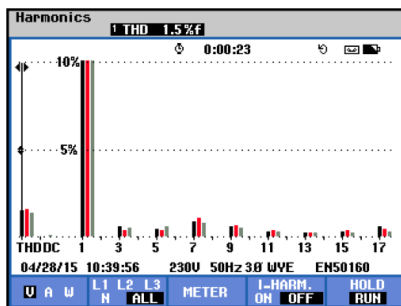
Figur E.1: Måleresultater stige-kabel underfordeling 3. etg. E-blokk.



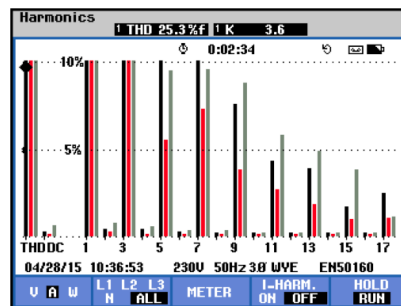
(a) Spenningskurver.



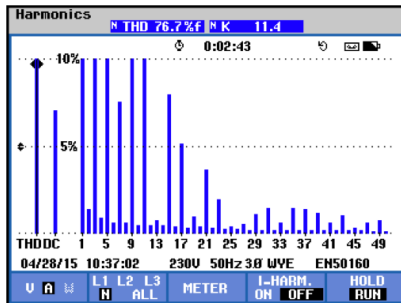
(b) Strømkurver.



(c) Overharmonisk spektrum, spenning.



(d) Overharmonisk spektrum, strøm.



(e) Overharmonisk spektrum N- leder, strøm.

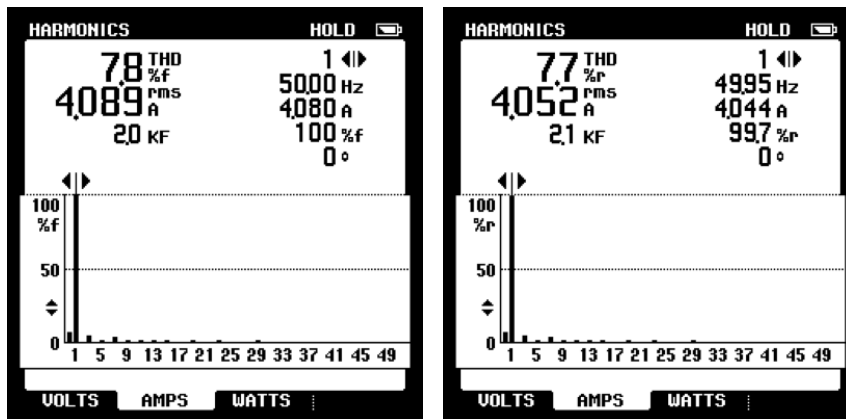
HARMONICS TABLE				
Volt	L1	L2	L3	N
THD% _f	1.5	1.5	1.3	161.2
H3% _f	0.5	0.4	0.5	88.6
H5% _f	0.4	0.4	0.6	4.4
H7% _f	0.8	1.1	0.7	23.9
H9% _f	0.6	0.6	0.5	103.2
H11% _f	0.3	0.3	0.2	21.9
H13% _f	0.2	0.2	0.2	8.9
H15% _f	0.3	0.4	0.2	50.1

(f) Overharmonisk tabell, spenning.

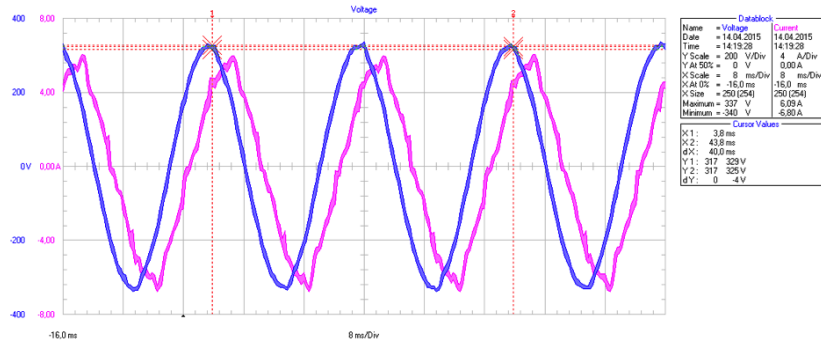
HARMONICS TABLE				
Amp	L1	L2	L3	N
THD% _f	25.3	16.3	27.2	77.9
H3% _f	17.4	12.2	20.4	67.4
H5% _f	10.7	5.5	9.4	21.9
H7% _f	10.7	7.2	9.4	7.8
H9% _f	7.5	3.8	8.6	26.5
H11% _f	4.3	2.7	5.7	12.2
H13% _f	3.9	1.8	4.7	0.9
H15% _f	1.7	1.0	3.7	8.0

(g) Overharmonisk tabell, strøm.

Figur E.2: Måleresultater stige-kabel underfordeling 3. etg. F-blokk.



(a) Overharmonisk spektrum (%Fund). (b) Overharmonisk spektrum (%RMS).

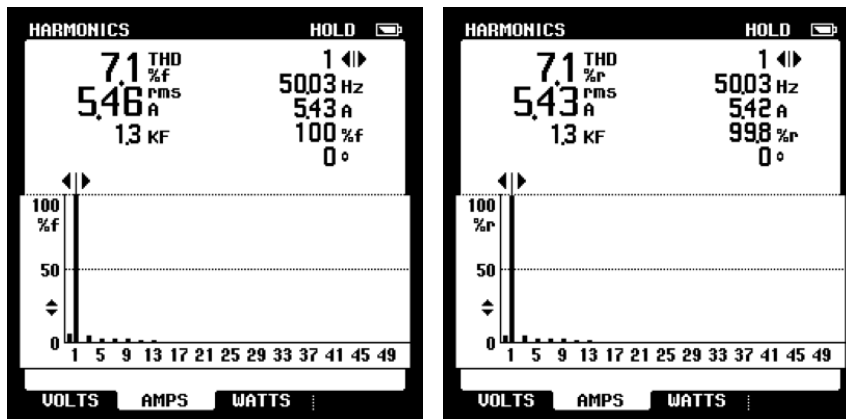


(c) Strøm- og spenningskurver.

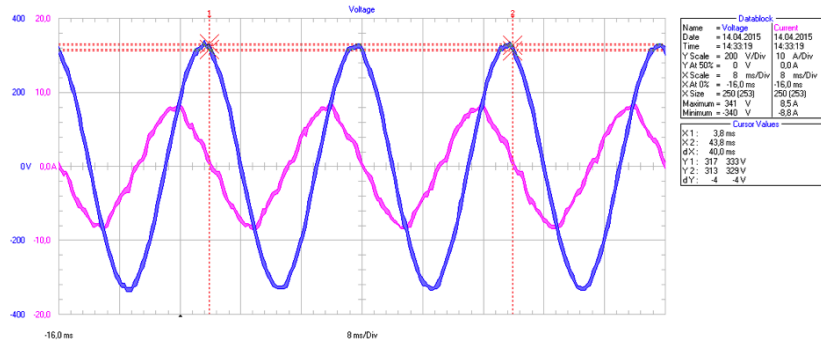
Figur E.3: Måleresultater kurs F81.

Tabell E.1: Tabelloversikt overharmoniske strømmer kurs F81.

Kurs	THD		3.h		5.h		7.h		9.h		11.h	
	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f
1	7,7	7,8	4,6	4,7	1,2	1,2	3,9	4	2,1	2	1,2	1,2



(a) Overharmonisk spektrum (%Fund). (b) Overharmonisk spektrum (%RMS).

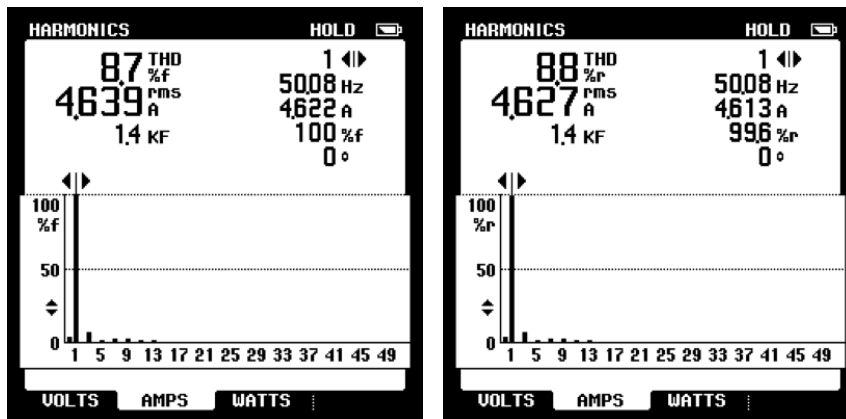


(c) Strøm- og spenningskurver.

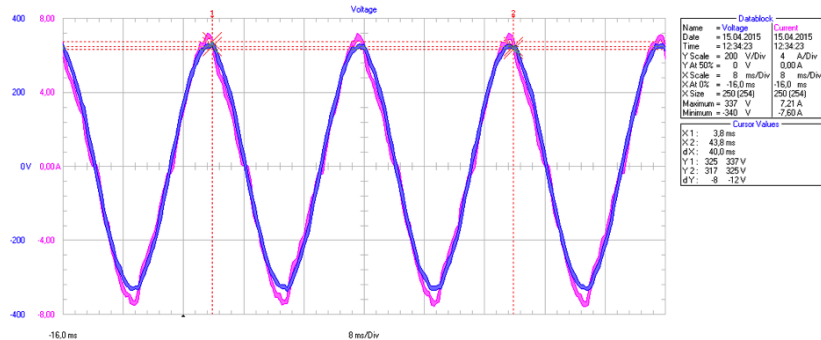
Figur E.4: Måleresultater kurs F83.

Tabell E.2: Tabelloversikt overharmoniske strømmer kurs F83.

Kurs	THD		3.h		5.h		7.h		9.h		11.h	
	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f
2	7,1	7,1	4,8	4,8	2,2	2,3	2,7	2,6	2,8	2,8	1,8	1,8



(a) Overharmonisk spektrum (%Fund). (b) Overharmonisk spektrum (%RMS).

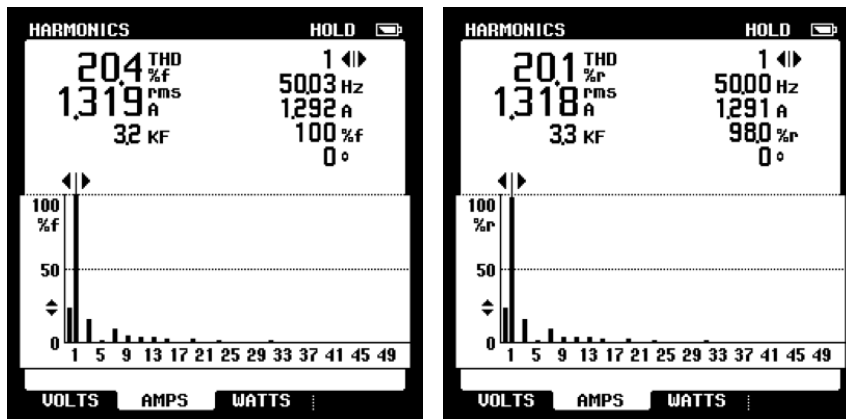


(c) Strøm- og spenningskurver.

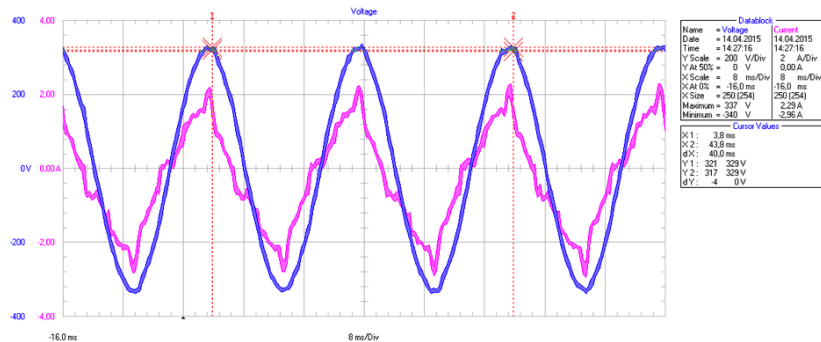
Figur E.5: Måleresultater kurs F80.

Tabell E.3: Tabelloversikt overharmoniske strømmer kurs F80.

Kurs	THD		3.h		5.h		7.h		9.h		11.h	
	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f
3	8,8	8,7	7,3	7,3	2,2	2,1	2,3	2,3	2,3	2,2	1,5	1,5



(a) Overharmonisk spektrum (%Fund). (b) Overharmonisk spektrum (%RMS).

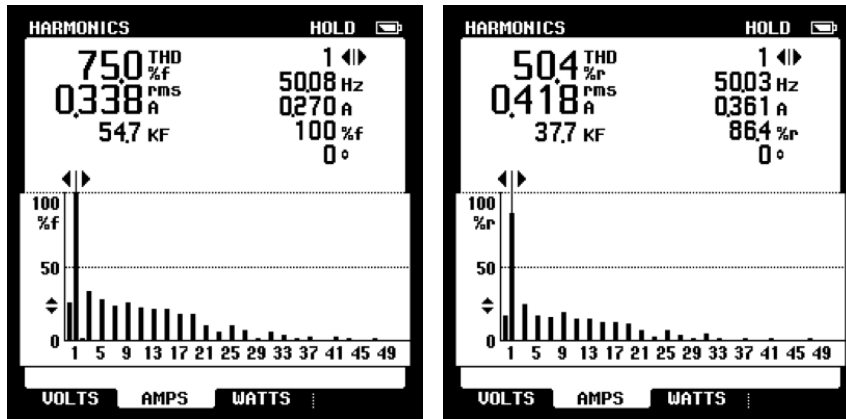


(c) Strøm- og spenningskurver.

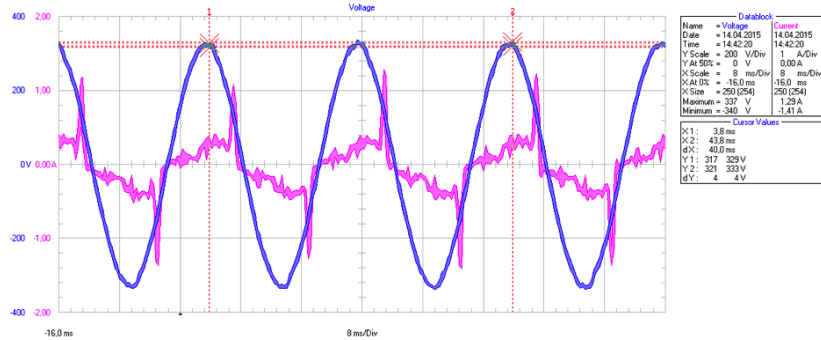
Figur E.6: Måleresultater kurs F82.

Tabell E.4: Tabelloversikt overharmoniske strømmer kurs F82.

Kurs	THD		3.h		5.h		7.h		9.h		11.h	
	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f
4	20,1	20,4	15,7	16,1	1,9	1,9	9	9,1	4,4	4,4	3,6	3,6



(a) Overharmonisk spektrum (%Fund). (b) Overharmonisk spektrum (%RMS).

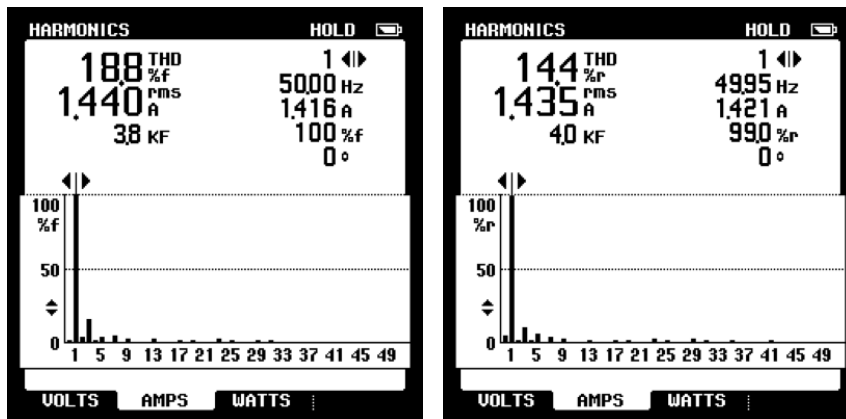


(c) Strøm- og spenningskurver.

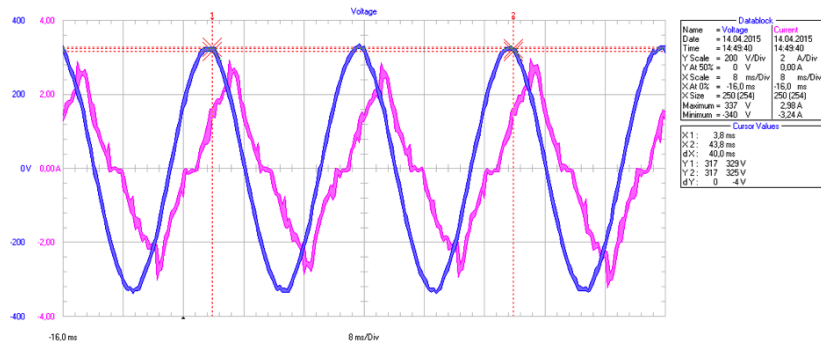
Figur E.7: Måleresultater kurs F41.

Tabell E.5: Tabelloversikt overharmoniske strømmer kurs F41.

Kurs	THD		3.h		5.h		7.h		9.h		11.h	
	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f
5	50,4	75	24,3	33,7	17	27,5	15,6	24,1	19,1	25,5	14,4	23



(a) Overharmonisk spektrum (%Fund). (b) Overharmonisk spektrum (%RMS).

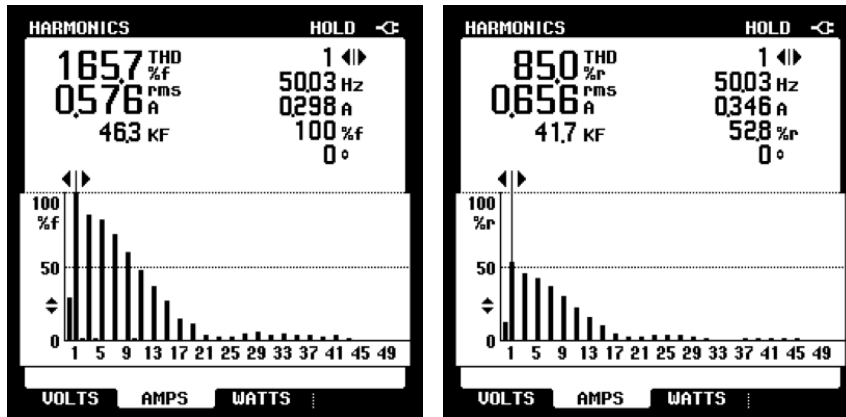


(c) Strøm- og spenningskurver.

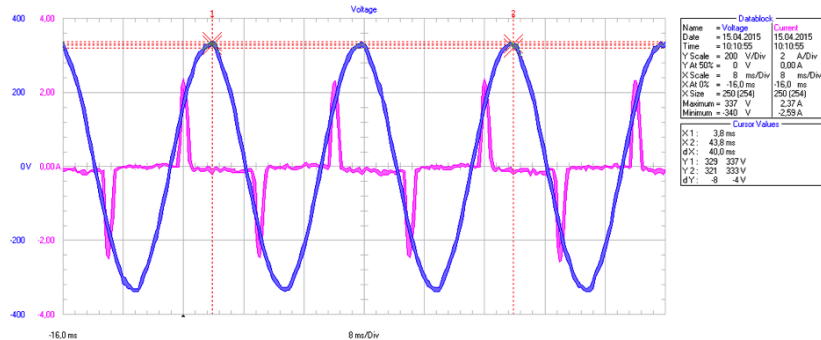
Figur E.8: Måleresultater kurs F43.

Tabell E.6: Tabelloversikt overharmoniske strømmer kurs F43.

Kurs	THD		3.h		5.h		7.h		9.h		11.h	
	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f
6	14,4	18,8	10,4	15,7	6	3,9	3,4	4,8	3	3,3	1	0,9



(a) Overharmonisk spektrum (%Fund). (b) Overharmonisk spektrum (%RMS).



(c) Strøm- og spenningskurver.

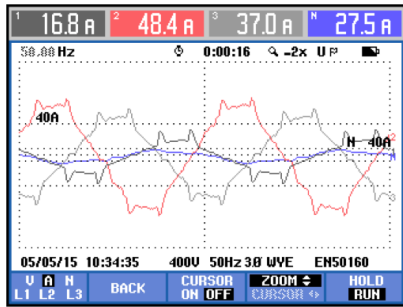
Figur E.9: Måleresultater kurs F72.

Tabell E.7: Tabelloversikt overharmoniske strømmer kurs F72.

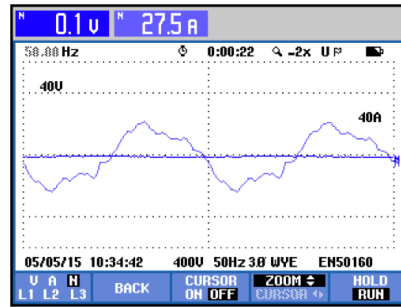
Kurs	THD		3.h		5.h		7.h		9.h		11.h	
	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f
7	85	165,7	46	85,4	42,8	81,8	36,9	71,6	30,1	59,4	22,7	47,3

Vedlegg F

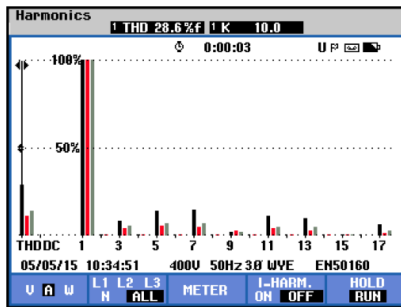
Måleresultater Brattørkaia 15,
Trondheim



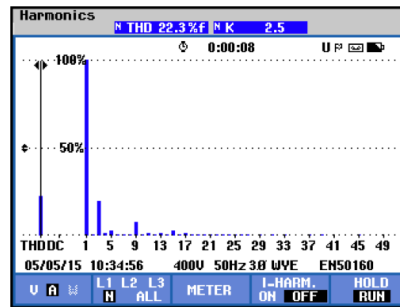
(a) Strømkurver L1, L2, L3 og N-leder.



(b) Strømkurver N-leder.



(c) Overharmonisk spektrum L1, L2 og L3, strøm.

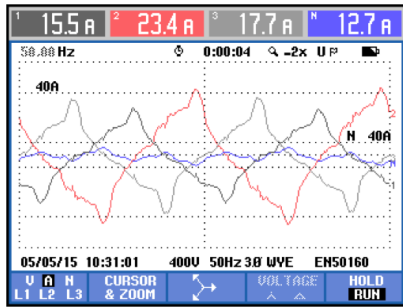


(d) Overharmonisk spektrum N-leder, strøm.

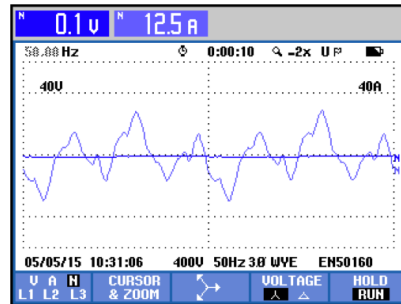
HARMONICS TABLE				
	L1	L2	L3	N
THD%f	27.2	10.6	19.9	19.2
H3%f	8.5	4.1	7.1	16.9
H5%f	13.5	5.6	10.0	3.3
H7%f	14.0	4.8	10.5	1.0
H9%f	2.1	2.5	2.1	6.8
H11%f	10.8	3.7	7.1	0.7
H13%f	8.6	2.7	6.1	2.2
H15%f	1.0	0.7	1.0	2.5

(e) Overharmonisk tabell, strøm.

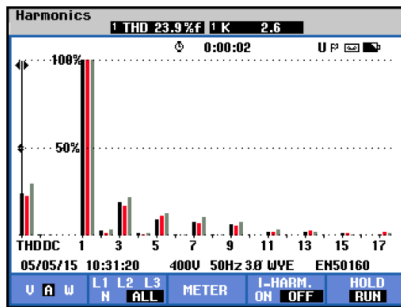
Figur F.1: Måleresultater stige-kabel XQ101, Brattørkaia 15.



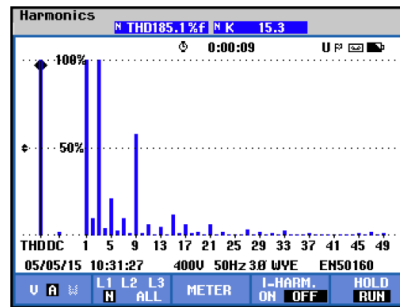
(a) Strømkurver L1, L2, L3 og N-leder.



(b) Strømkurver N-leder.



(c) Overharmonisk spektrum L1, L2 og L3, strøm.

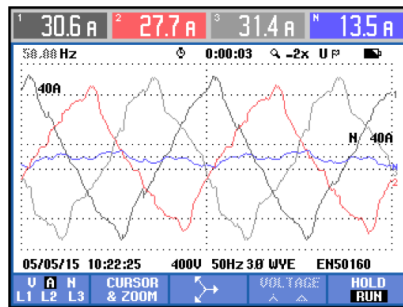


(d) Overharmonisk spektrum N-leader, strøm.

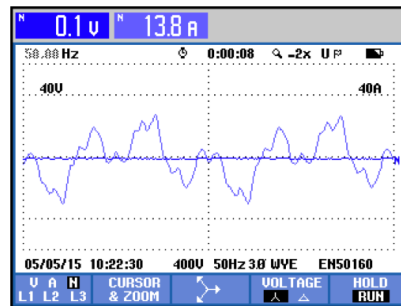
HARMONICS TABLE				
	L1	L2	L3	N
THD%f	23.1	21.5	29.2	186.9
H3%f	18.3	16.0	21.8	174.6
H5%f	8.5	10.6	12.9	19.7
H7%f	7.5	6.4	10.6	10.6
H9%f	6.2	5.6	7.4	58.8
H11%f	2.2	2.0	3.8	6.8
H13%f	1.9	2.9	2.3	5.2
H15%f	1.4	1.6	0.9	12.2

(e) Overharmonisk tabell, strøm.

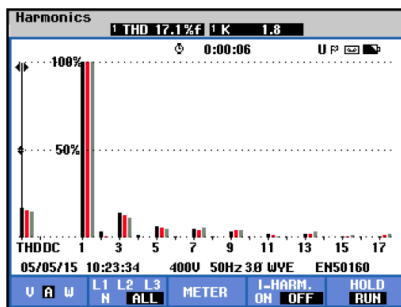
Figur F.2: Måleresultater stige-kabel XQ102, Brattørkaia 15.



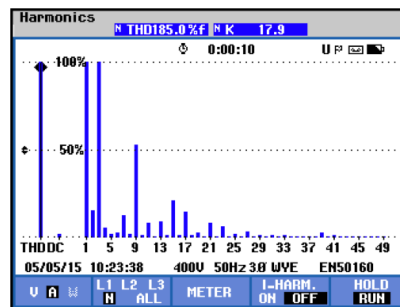
(a) Strømkurver L1, L2, L3 og N-leder.



(b) Strømkurver N-leder.



(c) Overharmonisk spektrum L1, L2 og L3, strøm.

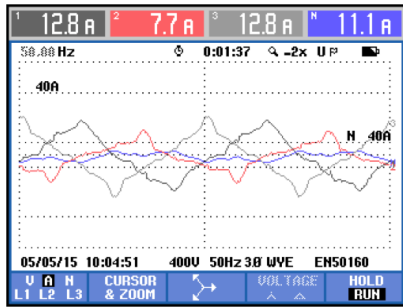


(d) Overharmonisk spektrum N-leder, strøm.

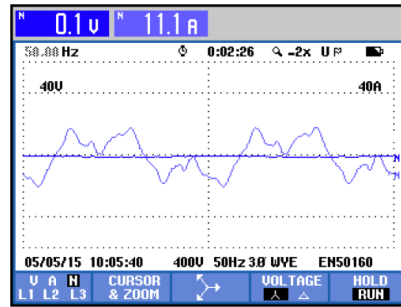
HARMONICS TABLE				
	L1	L2	L3	N
THD%f	15.2	16.1	15.1	122.8
H3%f	12.3	12.6	11.1	114.2
H5%f	5.5	6.2	5.9	2.5
H7%f	4.7	5.0	5.7	9.0
H9%f	2.9	4.5	4.4	38.6
H11%f	1.6	1.6	0.6	5.5
H13%f	1.7	2.3	2.8	5.5
H15%f	0.9	1.0	1.5	11.2

(e) Overharmonisk tabell, strøm.

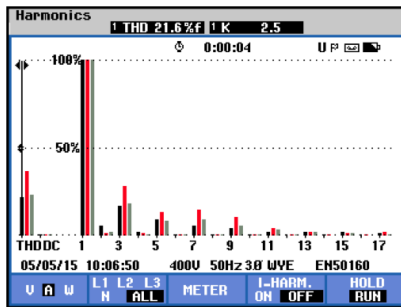
Figur F.3: Måleresultater stige-kabel XQ104, Brattørkaia 15.



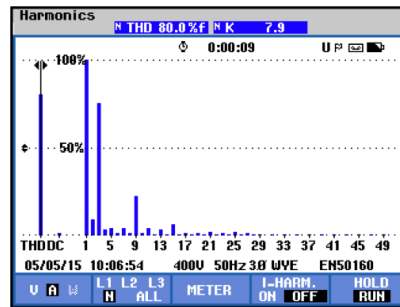
(a) Strømkurver L1, L2, L3 og N-leder.



(b) Strømkurver N-leder.



(c) Overharmonisk spektrum L1, L2 og L3, strøm.

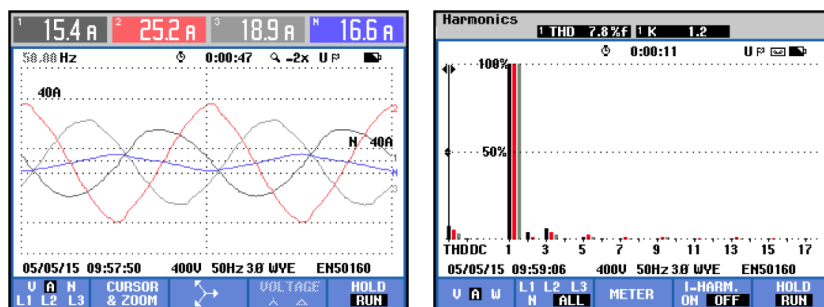


(d) Overharmonisk spektrum N-leder, strøm.

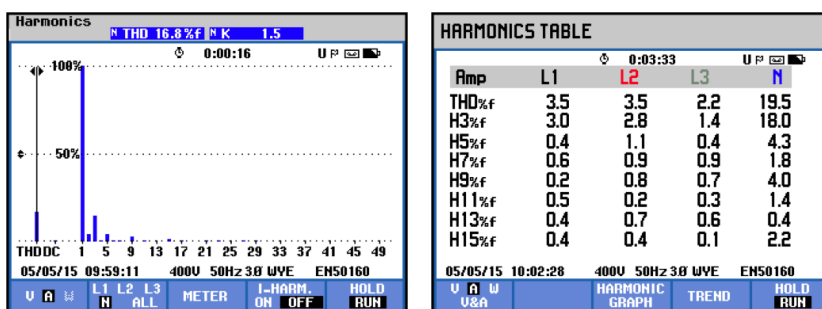
HARMONICS TABLE				
	L1	L2	L3	N
THD%f	18.2	29.1	26.3	108.0
H3%f	13.3	22.7	20.4	100.0
H5%f	7.6	8.6	9.4	16.4
H7%f	5.2	12.0	10.4	10.7
H9%f	3.2	8.5	6.4	29.6
H11%f	2.0	3.6	4.5	6.1
H13%f	2.2	2.4	2.7	5.5
H15%f	2.0	1.0	1.5	7.8

(e) Overharmonisk tabell, strøm.

Figur F.4: Måleresultater stige-kabel XQ105, Brattørkaia 15.

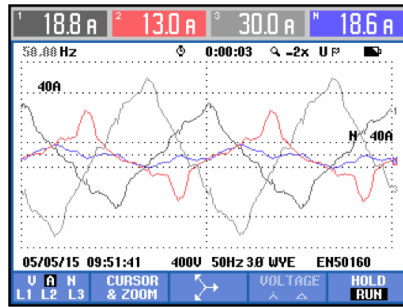


(a) Strømkurver L1, L2, L3 og N-leder. (b) Overharmonisk spektrum L1, L2 og L3, strøm.

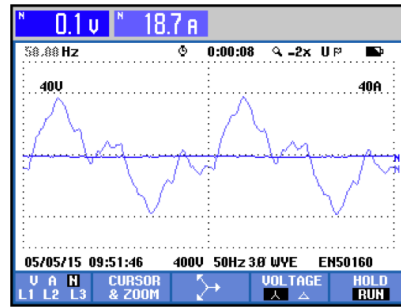


(c) Overharmonisk spektrum N-leder, strøm. (d) Overharmonisk tabell, strøm.

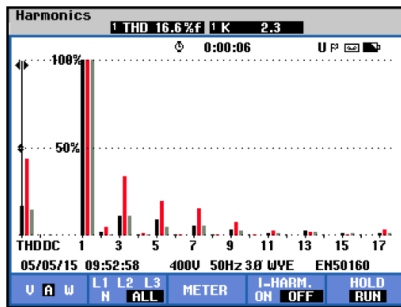
Figur F.5: Måleresultater stigeledning XQ106, Brattørkaia 15.



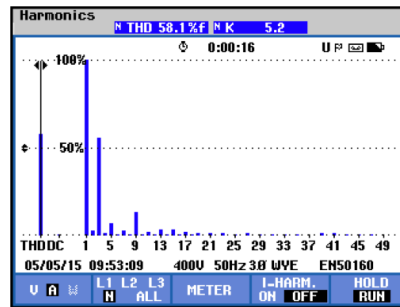
(a) Strømkurver L1, L2, L3 og N-leder.



(b) Strømkurver N-leder.



(c) Overharmonisk spektrum L1, L2 og L3, strøm.

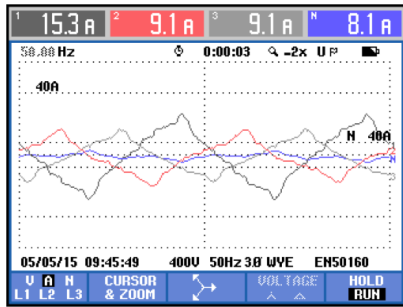


(d) Overharmonisk spektrum N-leader, strøm.

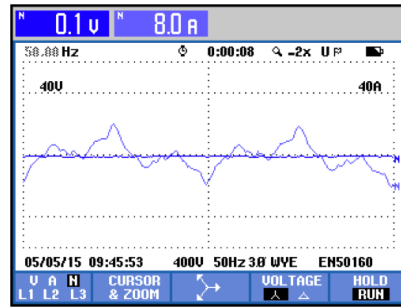
HARMONICS TABLE				
	L1	L2	L3	N
THD%f	16.1	43.2	14.6	59.2
H3%f	11.0	33.5	11.7	56.7
H5%f	8.2	19.0	4.6	5.5
H7%f	5.8	15.7	5.5	3.7
H9%f	3.5	8.5	2.5	13.3
H11%f	1.5	3.3	1.7	2.3
H13%f	2.7	2.2	2.3	4.0
H15%f	1.4	0.4	1.6	4.2

(e) Overharmonisk tabell, strøm.

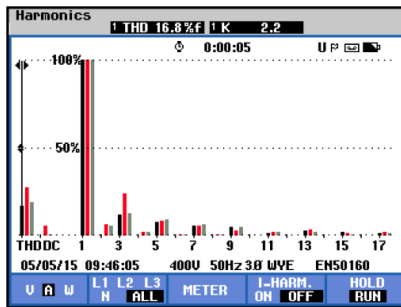
Figur F.6: Måleresultater stige-kabel XQ107, Brattørkaia 15.



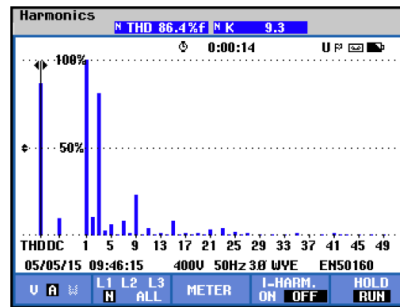
(a) Strømkurver L1, L2, L3 og N-leder.



(b) Strømkurver N-leder.



(c) Overharmonisk spektrum L1, L2 og L3, strøm.

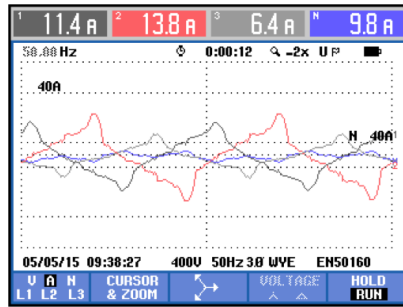


(d) Overharmonisk spektrum N-leder, strøm.

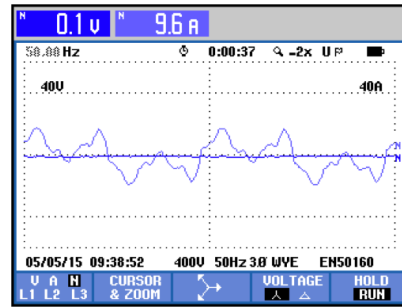
HARMONICS TABLE				
	L1	L2	L3	N
THD%f	16.8	27.7	17.4	83.5
H3%f	12.2	24.2	11.4	78.3
H5%f	7.7	8.2	8.7	5.7
H7%f	5.6	6.0	6.0	7.9
H9%f	5.0	3.1	4.7	22.9
H11%f	1.2	1.9	2.2	2.6
H13%f	2.5	3.0	1.5	1.4
H15%f	1.9	1.6	0.8	7.8

(e) Overharmonisk tabell, strøm.

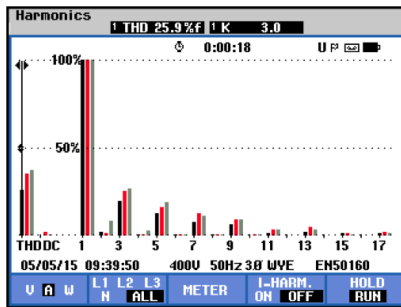
Figur F.7: Måleresultater stige-kabel XQ108, Brattørkaia 15.



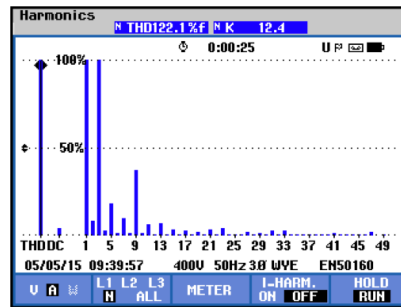
(a) Strømkurver L1, L2, L3 og N-leder.



(b) Strømkurver N-leder.



(c) Overharmonisk spektrum L1, L2 og L3, strøm.

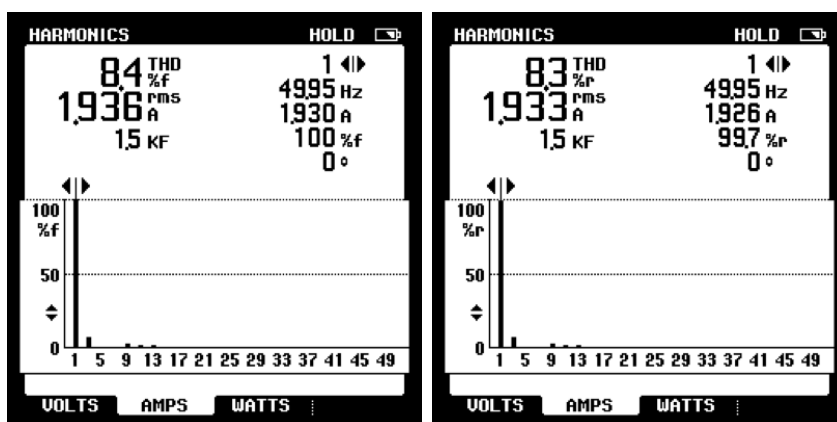


(d) Overharmonisk spektrum N-leder, strøm.

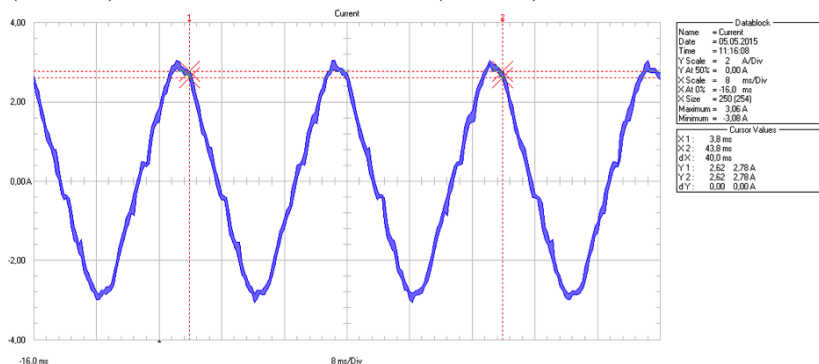
HARMONICS TABLE				
	L1	L2	L3	N
THD%f	25.9	34.7	37.5	125.4
H3%f	19.5	25.4	26.9	115.7
H5%f	12.8	16.4	19.0	20.3
H7%f	7.8	12.4	10.8	12.3
H9%f	6.4	8.8	9.1	39.1
H11%f	1.2	3.3	3.3	6.6
H13%f	2.7	4.7	3.7	6.3
H15%f	1.4	0.8	0.7	2.6

(e) Overharmonisk tabell, strøm.

Figur F.8: Måleresultater stigekabel XQ109, Brattørkaia 15.



(a) Overharmonisk spektrum (%Fund). (b) Overharmonisk spektrum (%RMS).

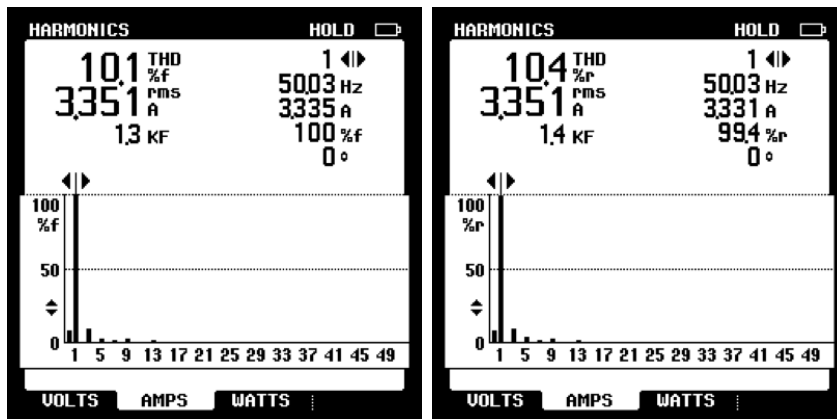


(c) Strømkurve.

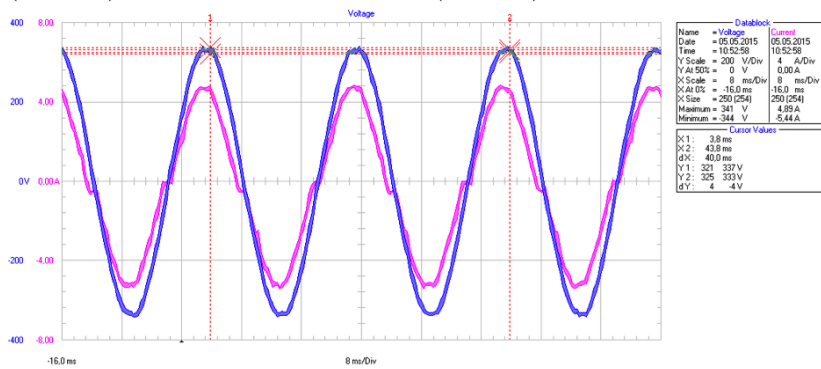
Figur F.9: Måleresultater kurskabel XF201, Brattørkaia 15.

Tabell F.1: Tabelloversikt overharmoniske strømmer kurs XF201.

Kurs	THD		3.h		5.h		7.h		9.h		11.h	
	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f
XF201	8,3	8,4	7,2	7,2	0,7	0,8	0,5	0,6	2,5	2,6	1,2	1,4



(a) Overharmonisk spektrum (%Fund). (b) Overharmonisk spektrum (%RMS).

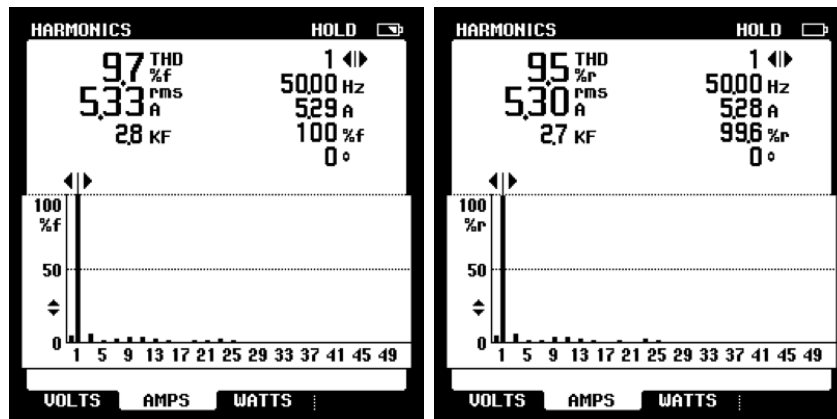


(c) Strøm- og spenningskurve.

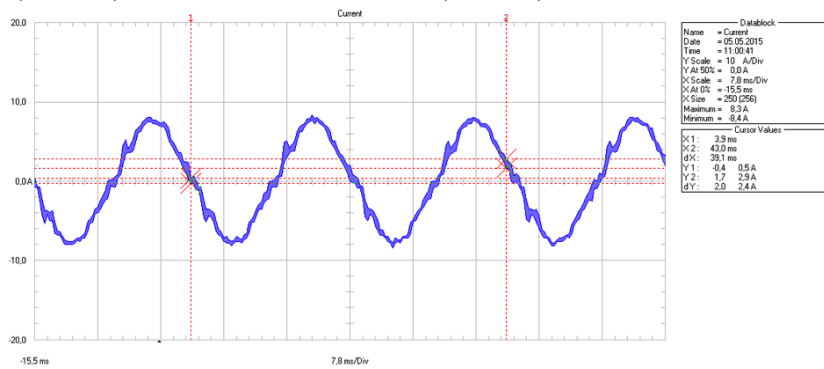
Figur F.10: Måleresultater kurskabel XF210, Brattørkaia 15.

Tabell F.2: Tabelloversikt overharmoniske strømmer kurs XF210.

Kurs	THD		3.h		5.h		7.h		9.h		11.h	
	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f
XF210	10,4	10,1	9,4	8,9	3,4	3,2	1,8	1,8	2,3	2,3	1,1	1



(a) Overharmonisk spektrum (%Fund). (b) Overharmonisk spektrum (%RMS).

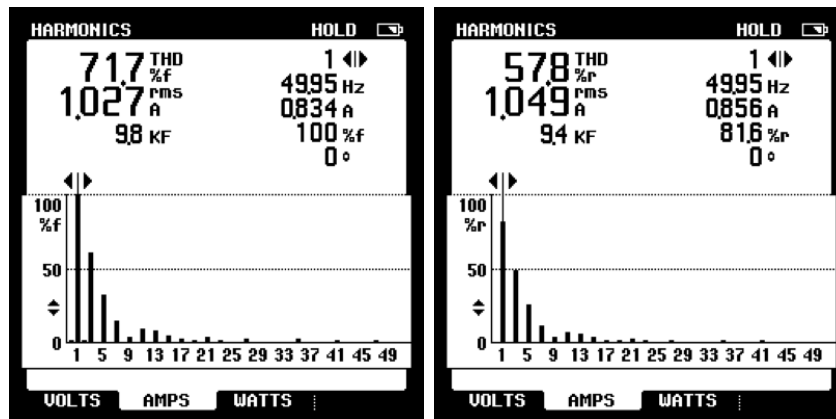


(c) Strømkurve.

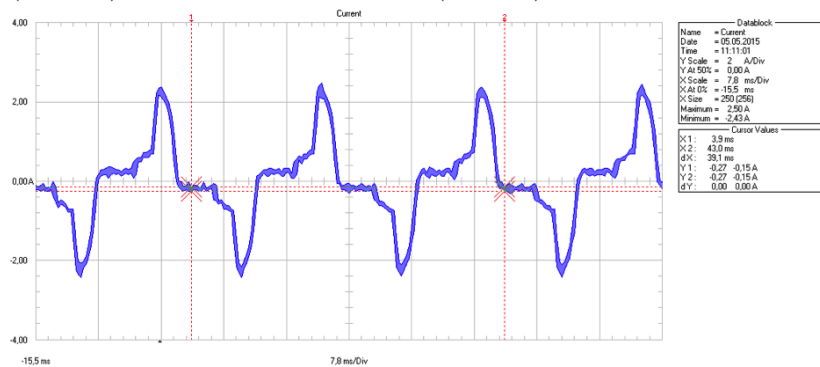
Figur F.11: Måleresultater kurskabel XF211, Brattørkaia 15.

Tabell F.3: Tabelloversikt overharmoniske strømmer kurs XF211.

Kurs	THD		3.h		5.h		7.h		9.h		11.h	
	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f
XF211	9,5	9,7	5,7	5,9	2	1,9	2,1	2,3	3,3	3,4	3,4	3,5



(a) Overharmonisk spektrum (%Fund). (b) Overharmonisk spektrum (%RMS).



(c) Strømkurve.

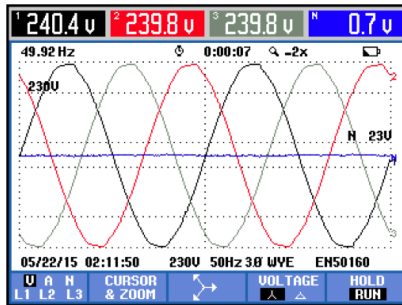
Figur F.12: Måleresultater kurskabel XF113, Brattørkaia 15.

Tabell F.4: Tabelloversikt overharmoniske strømmer kurs XF113.

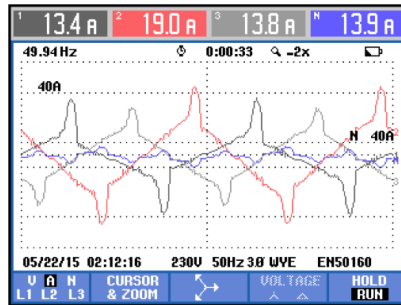
Kurs	THD		3.h		5.h		7.h		9.h		11.h	
	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f
XF113	71,7	57,8	48,7	60,5	26	32,1	11,9	14,7	3,4	3,9	7,3	9

Vedlegg G

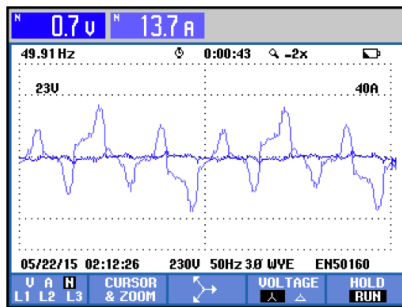
Måleresultater P15-bygget, NTNU Gløshaugen



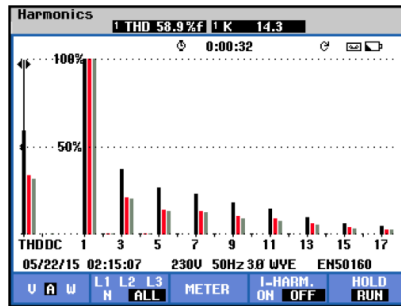
(a) Spenningskurver.



(b) Strømkurver L1, L2 og L3



(c) Strømkurver N-leder.



(d) Overharmonisk spektrum L1, L2 og L3, strøm.

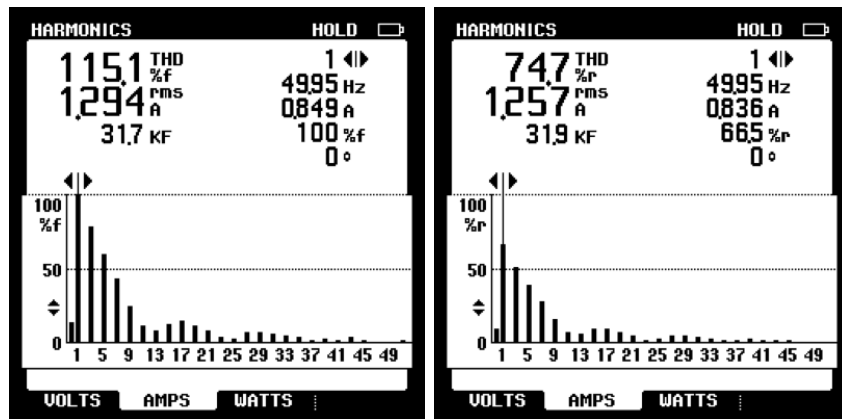
HARMONICS TABLE				
Amp	L1	L2	L3	N
THD% _f	58.3	32.5	30.3	203.7
H3% _f	36.8	20.8	20.3	178.5
H5% _f	26.6	13.7	12.8	13.4
H7% _f	23.1	12.8	12.4	17.4
H9% _f	18.8	10.2	8.5	85.3
H11% _f	15.1	8.7	7.3	12.0
H13% _f	10.5	6.6	5.4	9.6
H15% _f	6.4	4.1	3.4	31.8

(e) Overharmonisk tabell, strøm. og spenning.

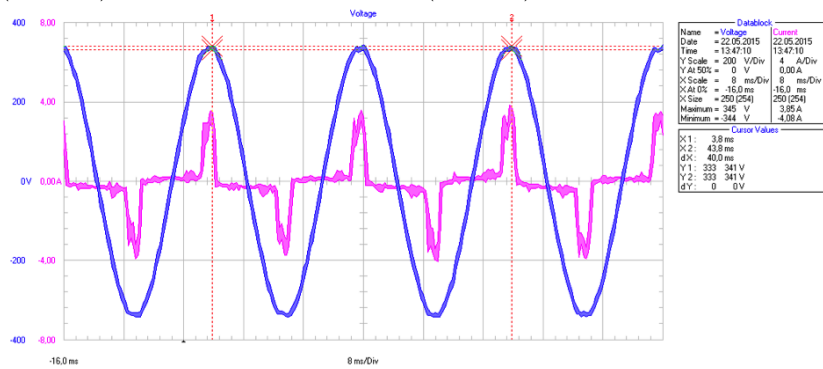
HARMONICS TABLE				
Volt	L1	L2	L3	N
THD% _f	1.0	1.0	0.9	127.0
H3% _f	0.3	0.2	0.1	74.6
H5% _f	0.3	0.2	0.2	6.2
H7% _f	0.5	0.5	0.4	14.1
Amp	L1	L2	L3	N
H3% _f	37.5	21.4	21.1	181.0
H5% _f	26.6	14.2	13.6	12.8
H7% _f	22.6	12.9	12.9	16.4

(f) Overharmonisk tabell, strøm

Figur G.1: Måleresultater stige kabel XQ101, Brattørkaia 15.



(a) Overharmonisk spektrum (%Fund). (b) Overharmonisk spektrum (%RMS).

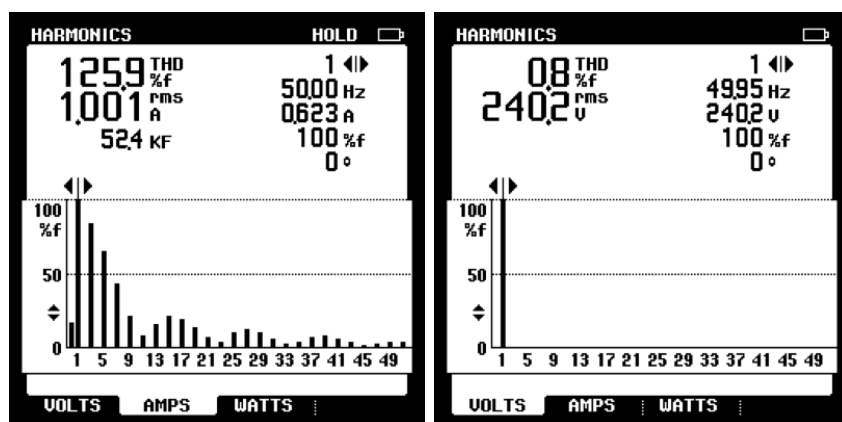


(c) Strøm- og spenningskurve.

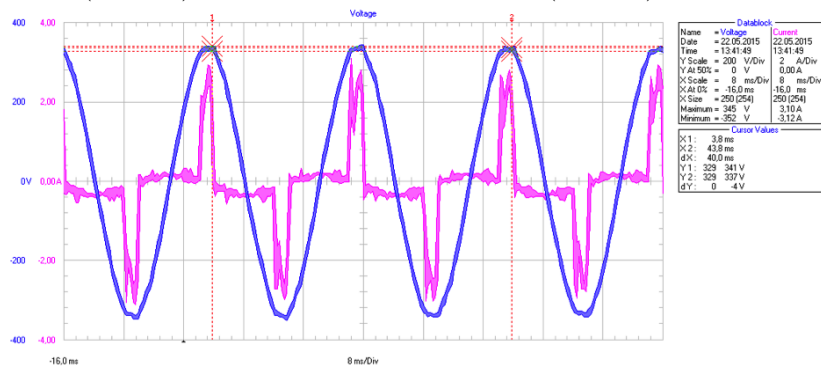
Figur G.2: Måleresultater kurskabel XQ306, P15-bygget.

Tabell G.1: Tabelloversikt overharmoniske strømmer kurs XQ306.

Kurs	THD		3.h		5.h		7.h		9.h		11.h	
	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f
XQ306	74,7	115,1	51	77,9	38,6	60	28,1	43,9	15,5	25,1	7,1	11,6



(a) Overharmonisk spektrum strøm (%Fund). (b) Overharmonisk spektrum spenning (%Fund).

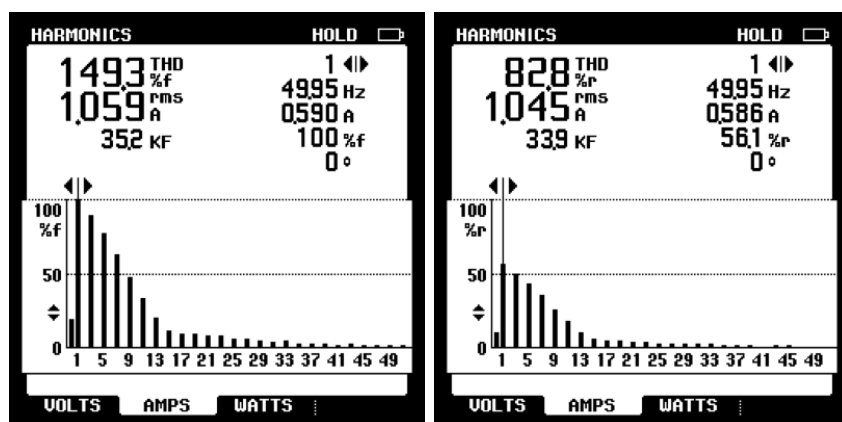


(c) Strøm- og spenningskurve.

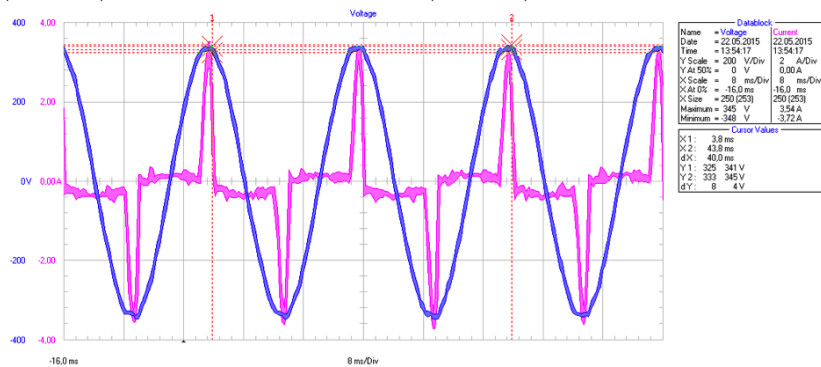
Figur G.3: Måleresultater kurskabel XQ307, P15-bygget.

Tabell G.2: Tabelloversikt overharmoniske strømmer kurs XQ307.

Kurs	THD		3.h		5.h		7.h		9.h		11.h	
	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f
XQ307	78,3	125,9	51,5	84,3	39,9	65,6	26,4	43,7	12,9	21,7	6,7	8,6



(a) Overharmonisk spektrum (%Fund). (b) Overharmonisk spektrum (%RMS).

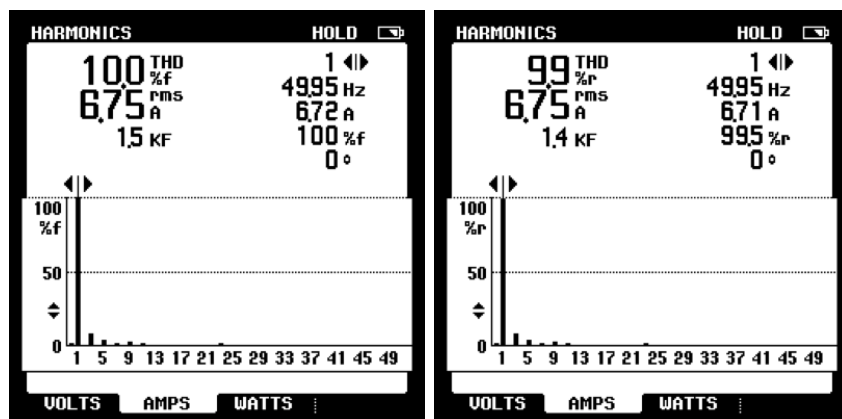


(c) Strøm- og spenningskurve.

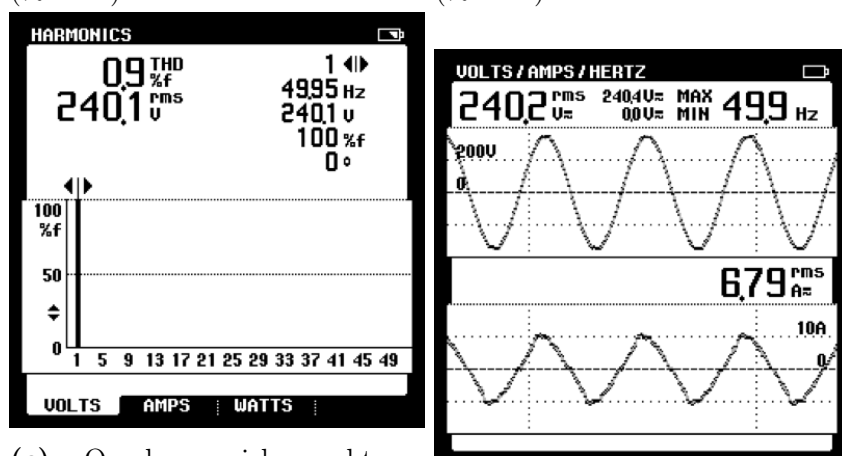
Figur G.4: Måleresultater kurskabel XQ309, P15-bygget.

Tabell G.3: Tabelloversikt overharmoniske strømmer kurs XQ309.

Kurs	THD		3.h		5.h		7.h		9.h		11.h	
	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f
XQ309	82,8	149,3	49,8	89,3	42,9	77,1	35,2	63,6	26,2	47,3	18,2	33,1



(a) Overharmonisk spektrum (%Fund). (b) Overharmonisk spektrum (%RMS).



(c) Overharmonisk spektrum spenning (%Fund). (d) Strøm- og spenningskurve.

Figur G.5: Måleresultater kurskabel XQ020, P15-bygget.

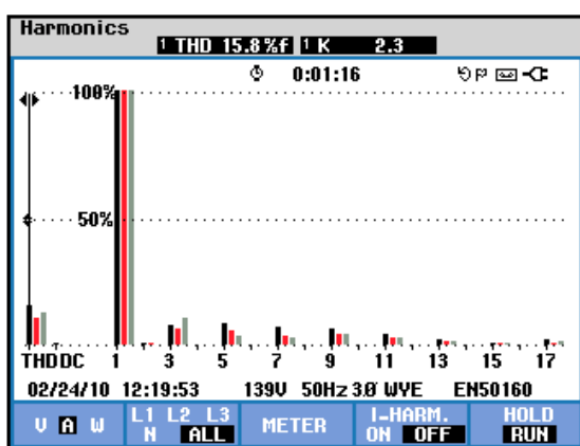
Tabell G.4: Tabelloversikt overharmoniske strømmer kurs XQ020.

Kurs	THD		3.h		5.h		7.h		9.h		11.h	
	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f	%r	%f
XQ020	9,9	10	8,3	8,3	3,5	3,5	1,4	1,4	2,8	2,7	1,8	1,9

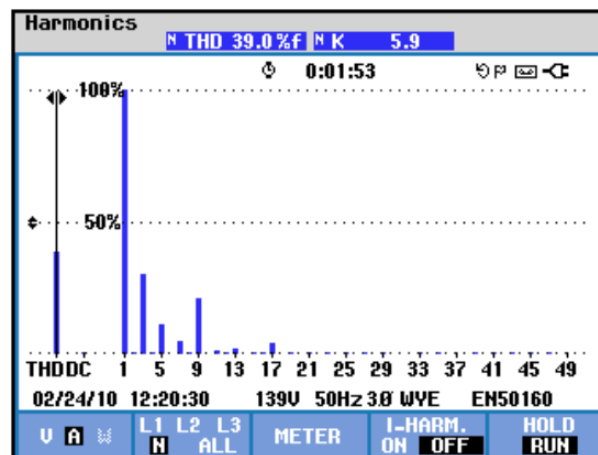
Vedlegg H

Måleresultater tidligere masteroppgave

Figurene H.1 og H.2 viser henholdsvis måleresultatene for stigekabelen i E-blokken og målinger på kursnivå gjennomført i 2010. Dette er måleresultater hentet fra masteroppgaven Dimensjonering av ledertverrsnitt i anlegg med overharmoniske strømmer [33].



(a) Overharmonisk spektrum faseledere [33].



(b) Overharmonisk spektrum N-leder [33].

HARMONICS TABLE				
	3s 0:00:30			
Volt	L1	L2	L3	N
THD%f	1.2	1.0	1.1	44.5
H3%f	0.5	0.5	0.6	25.8
H5%f	0.8	0.5	0.6	6.2
H7%f	0.3	0.3	0.2	2.2
Amp	L1	L2	L3	N
THD%f	15.7	10.6	12.7	39.2
H3%f	7.5	6.8	10.5	30.4
H5%f	8.5	5.4	3.8	11.4
02/24/10 12:19:07 139V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W	HARMONIC GRAPH		TREND	HOLD RUN
U&A				

(c) Harmoniske verdier [33].

Figur H.1: Måleresultater stigekabel underfordeling 3. etg. E-blokk masteroppgave år 2010 [33].

Målested	Strøm [A]	Strøm THD [%F]	Strøm 3h [%RMS]	Andre kommentarer
Lys korridor	4,44	25,9	20,4	Vern:16A
Lys verksted	5,51	14,2	12,8	Vern: 10A
Lys lab	6,23	11,1	9,5	Vern: 10A
Lys kontor	1,63	16,3	14,5	Vern: 10A
Lys verksted	6,92	13,3	13,0	Vern: 10A
Stikk kontor	3,75	41,6	30,9	Vern:16A
Stikk kontor	0,65	33	22,4	Vern:16A
Stikk kontor	1,64	55,4	36,5	Vern:16A
Stikk lyslab	0,44	72,6	36,2	Vern:16A
Stikk lyslab	0,36	70	48,2	Vern:16A

Figur H.2: Måleresultater fra målinger i Elektrobygget på kursnivå [33].