

**Forundersøgelse  
af muligheder for  
energibesparelser i erhvervslivet  
ved reduktion af  
overharmoniske strømme**

**August 2009**

**Dansk Energi Analyse A/S**

**Forundersøgelse  
af muligheder for  
energibesparelser i erhvervslivet  
ved reduktion af  
overharmoniske strømme**

Elforsk projektnr.: 341-030

Udarbejdet af: Mogens Johansson, Dansk Energi Analyse A/S  
Jonas M. Kehr, ABB A/S  
Henning Højte Hansen, Balslev A/S

August 2009

Dansk Energi Analyse A/S  
Vodroffsvej 32  
1900 Frederiksberg C  
CVR-nr. 16259942

# Indhold

Sammenfatning .....	3
Summary .....	4
1. Indledning .....	6
2. Harmoniske strømme og spændingers fysik.....	6
2.1 Årsager til harmoniske.....	6
2.2 Matematikken .....	7
2.3 Regler.....	8
3. Den harmoniske forvrængnings indflydelse på energieffektiviteten.....	8
3.1 Generelt.....	8
3.2 Asynkronmotoren .....	9
3.3 Jævnstrømsmotorer.....	10
3.4 Transformere.....	10
3.5 Kabler .....	10
3.6 Et eksempel.....	10
4. Omfanget af harmonisk forvrængning i dansk industri.....	11
4.1 Måleresultater .....	12
5. Reduktion af harmonisk forvrængning.....	13
5.1 Udstyr til nedbringelse af spændingsforvrængninger.....	13
5.2 Forebyggelse af problemer med harmonisk forvrængning.....	14
5.3 Fasekompensering .....	15
5.4 UPS og reservekraft.....	15
6. Energibesparelser i industrien ved reduktion af de harmoniske.....	16
6.1 Eksempler på energibesparelser opnået med anvendelse af aktive filtre .....	16
6.1.1 Elbesparelser på ekstruderlinie .....	16
6.1.2 Papirmaskine.....	18
6.2 Vurdering af sparepotentialet i dansk industri.....	20
7. Litteratur .....	22
Bilag 1. Eksempler på strømkurver og harmoniske.....	23
Bilag 2. Målinger af THD i 10 virksomheder.....	31

## Sammenfatning

I elforsyningsnettet regnes strøm og spænding normalt for sinusformede, men på grund af generatorer, der ikke er helt ideelle, samt belastninger med ikke-sinusformet strømoftag – det er bl. a. lysstofrør, frekvensomformere, UPS-anlæg og PC'ere - bliver såvel strøm som spænding deformeret. Den deformerede strøm og spænding beskrives matematisk som en kombination af sinusformede strømme, hhv. spændinger med frekvenser, der er multipla af grundfrekvensen på 50 Hz. Strømme og spændinger med højere frekvenser end 50 Hz kaldes overharmoniske eller for enkelheds skyld blot harmoniske.

Overharmoniske strømme medfører øgede tab i forsyningsnettet (ledninger, transformere) og i motorer, som forsynes direkte fra nettet (men ikke i motorer, der forsynes fra frekvensomformer eller ensretter). De overharmoniske strømme kan reduceres eller fjernes med kondensatorbatterier og aktive filtre. Aktive filtre tilpasser sig de varierende belastningsforhold uden tidsforsinkelse. Endnu er der kun få erfaringer med aktive filtre i erhvervslivet, men de peger i retning af elbesparelser på op til 10% i installationer, hvor der er mange overharmoniske spændinger (THDU over 5%).

På ovennævnte baggrund har Elforsk bevilget en forundersøgelse af muligheder for energibesparelser i dansk erhvervsliv ved reduktion af de overharmoniske. Der er undersøgt, hvor i erhvervslivet der er problemer med overharmoniske, og hvor store problemerne er, og merforbruget af el er belyst teoretisk og ud fra elbesparelserne i installationer med aktive filtre.

Omfanget af harmonisk forvrængning er målt i 10 virksomheder og er sammenstillet med allerede eksisterende målinger. Det vurderes, at spændingsforvrængningen, udtrykt ved THDU, mindst skal være 5-6% for, at det kan være økonomisk rentabelt at reducere de harmoniske ved hjælp af et aktiv filter. I ca. 40% af de tilfælde, hvor THDU er målt, vurderes der ud fra THDU, strøm og benyttelsestid at være et sandsynligt eller muligt potentiale for elbesparelser ved reduktion af THDU. Da installationerne ikke er tilfældigt udvalgte, men udvalgt som potentielt interessante, er potentialet i dansk erhvervsliv væsentligt mindre end de ca. 40% og anslås at omfatte 10-20% af installationerne.

De overharmoniske strømme medfører ekstra strømvarmetab i direkte forsynede motorer og i ledninger og transformere. I asynkronmotorer medfører de også strømvarmetab i rotoren, og de 5., 11., 17. osv. harmoniske skaber et pulserende eller reduceret drejningsmoment, der også medfører tab.

ABB og Comsys, der begge leverer aktive filtre, har opgjort elbesparelsen i nogle installationer med aktive filtre. Den direkte elbesparelse er opgjort til nogle få procent i produktionsudstyr generelt og op til 16% i nogle direkte forsynede asynkronmotorer. Ud over den direkte elbesparelse kan filtrene også resultere i øget produktion som følge af færre nedbrud (filtrene forbedrer spændingskvaliteten og reducerer pulserende motor-momenter), besparelser i udgifter til reaktiv effekt, øget kapacitet af udstyr fordi tabene reduceres, længere levetid for udstyr m.m.

På baggrund af omfanget af harmonisk forvrængning i dansk erhvervsliv, ovennævnte erfaringer med elbesparelser ved aktive filtre samt et elforbrug i direkte forsynede motorer på omkring 7.000 GWh/år vurderes potentialet for elbesparelser i kraft af aktive filtre til omkring 30 – 60 GWh/år.

## Summary

Within power supply networks, current and voltage are normally regarded as sinusoidal. However, current as well as voltage are deformed because of inappropriate generators and loads with a non-sinusoidal current collection, e.g. fluorescent lamps, frequency converters, UPS-systems and PC's. The deformed current and voltage are mathematically described as a combination of sinusoidal currents and voltages with frequencies, which are multiple of the fundamental frequency of 50 Hz. Currents and voltages with higher frequencies than 50 Hz are called overharmonics or simply only harmonics.

Overharmonic currents cause additional losses in the power supply network (lines, transformers) and in motors, which are supplied directly from the network (not motors, which are supplied from frequency converters or rectifiers). The overharmonic currents can be reduced or removed by capacitor banks and active filters. Active filters adjust themselves to the loading conditions and are also reacting on too slow transients and voltage disturbances in the network. Till now there is only little experience with active filters in commercial life. However, there are indications of potential electricity savings up to 10 % in installations with many overharmonic voltages (THDU > 5 %).

Based on the above knowledge, Elforsk has granted a preliminary study of potential energy savings within business and industry by a reduction of the overharmonics. It has been investigated in what sectors there are problems with overharmonics and how large these problems are. In connection with this investigation, the additional electricity consumption has been examined theoretically compared to energy savings in installations with active filters.

The extent of harmonic distortions has been measured in 10 firms and has been compared to previous measurements. It is estimated that the voltage distortion, measured in THDU, at least must be 5 or 6 % in order to establish a profitable solution by reducing the harmonics by means of an active filter. In approx 40 % of the cases where the THDU has been measured, it has been estimated on the basis of THDU, current and utilization time that there is a potential of electricity savings by reducing the THDU. As the installations have not been randomly selected, but selected as potentially interesting, the potential in the Danish business and industry is considerably lower, and it is estimated to comprise 10 to 20 % of all installations.

The overharmonic currents cause additional current heating losses in directly supplied motors as well as in lines and transformers. In induction motors they also cause current heating losses in the rotor and the 5<sup>th</sup>, 11<sup>th</sup>, 17<sup>th</sup> etc harmonics make a pulsating or reduced torque, which implies further losses.

ABB and Comsys, both of which deliver active filters, have calculated electricity savings in some installations equipped with active filters. The direct electricity savings have been estimated at a low per cent in production equipment generally and up to 16 % in some directly supplied induction motors. In addition to the direct electricity savings the filters may also result in increased production capacity as a consequence of fewer breakdowns (the filters improve the voltage quality and provide reduced pulsating motor torques), reduced costs for reactive power and a longer lifetime for production equipment.

On the basis of the extent of harmonic distortions in Danish business and industry, our experience with electricity savings with active filters and the electricity consumption in directly supplied motors of approx 7,000 GWh/year, the potential electricity savings by installing active filters are estimated at 30 to 60 GWh/year.

## 1. Indledning

Dansk Energi Analyse A/S søgte i 2008 i samarbejde med ABB A/S og Balslev A/S støtte fra Elforsk til projektet "Energibesparelser i erhvervslivet gennem reduktion af de overharmoniske strømme". Baggrunden for projektforslaget var, at ABB i nogle udenlandske virksomheder for visse produktionsmaskiner har målt elbesparelser på 14% og 10% som resultat af aktive filtre, der reducerer de harmoniske strømme og spændinger. Projektet ville derfor undersøge, hvor i danske erhvervsliv, der er problemer med overharmoniske, hvor store problemerne er, hvor store elbesparelser, der disse steder kan opnås med aktive filtre, samt hvad tilbagebetalingstiden ville være.

Elforsk stillede sig forbeholden over for besparelspotentialer på 10 og 14%, men valgte at støtte en forundersøgelse af mulighederne. Forundersøgelsen er gennemført i perioden marts – juli 2009. I undersøgelsen er der gennemført målinger af omfanget af harmonisk forvrængning i 10 virksomheder. Den teoretiske baggrund for merforbruget af el som følge af de harmoniske er blevet belyst, og der er indhentet erfaringer med elbesparelser i installationer, hvor der i dag anvendes aktive filtre.

## 2. Harmoniske strømme og spændingers fysik

### 2.1 Årsager til harmoniske

Harmonisk forvrængning af strøm og spænding i forsyningsnettet, i industrien og hos almindelige forbrugere kan have mange årsager.

I produktionsledet, på kraftværkerne, kan der ikke regnes med en ren sinusformet udgangsspænding. Generatorer producerer også harmoniske spændinger, fordi der findes rippel i magnetiseringsspændingen/strømmen og fordi rotorviklingerne ligger i noter i turbogeneratorer eller med udprægede poler i de langsomt løbende generatorer, hvilket tilsammen skaber et deformet magnetfelt og dermed harmonisk indhold i spændingen. Trods deformationen af sinusformen lykkes det alligevel at producere og levere el med en lille spændingsforvrængning i det danske produktions- og distributionssystem. Og selv ved mindre generatoranlæg, f. eks. til reservekraft, er der sjældent en selvskabt spændingsforvrængning på mere end 1-3 % .

I forbrugsledet ser det helt anderledes ud. Her har industrien og fabrikanter af elektrisk materiel en stor opgave at varetage, idet der kommer forstyrrelser fra lysdæmpninger, computere, fladskærme og fra hastighedsregulerede motorer til f.eks. køl og ventilation. Denne form for brugsgenstande og installationer, hvor strømkurve og spændingskurve ikke er ens i form (ikke er ligedannede), kaldes under ét ulineære belastninger.

Enhver optagelse af strøm fra nettet, hvor strømkurven ikke er ligedannet med spændingskurven, vil deformere spændingskurven. Kortslutningsimpedansen er væsentlig for størrelsen af deformationen, da det er over denne impedans, at strømmen (de harmoniske strømme) skaber det harmoniske spændingsfald. Jo svagere net (jo mindre kortslutningsstrøm), jo større harmonisk forvrængning.

Distributionsledets spændingskvalitet er med hensyn til forvrængning meget afhængigt af forbrugets strømovertoner. Således er den endelige forvrængning af spændingen lig med den grundlæggende forvrængning set uden belastning plus spændingsfaldet ved hver overtone, baseret på nettets kortslutningsimpedans overfor den enkelte overtone i den optagne strøm.

En meget stor del af nutidens belastninger er ulineære og medvirker til at deformere spændingskurven:

- Energisparepærer, lysrør
- PC udstyr
- Alle former for ensretterudstyr og DC svejseanlæg
- UPS anlæg
- Frekvensomformere (omdrejningsregulering) inkl. DC anlæg
- Lysdæmpningsanlæg

I bilag 1 er vist forskellige eksempler på ulineær strømoftagelse.

De ovenfor nævnte belastninger betyder hver især kun lidt for den aktuelle forvrængning, men ordsproget ”mange bække små gør en stor å” gælder også her.

## 2.2 Matematikken

Der findes metoder til at beregne hvilke harmoniske, der optræder i strøm og spænding, afhængig af kurveformernes udseende. Teorien har den franske matematiker Joseph Fourier udviklet. Kort fortalt udviklede Fourier en fremgangsmåde, hvor tre integraler løses med den aktuelle kurveform som integrant og reduceres til en uendelig række bestående af addent, hvis kurveformen indeholder jævnstrømsled, en multiplikator og en uendelig række af led med stigende frekvens udtrykt med  $\sin x$  og  $\cos \alpha$ .

For et ensretterbelastet net bliver udtrykket for fasestrømmen:

$$y = \frac{4a}{\pi} \left( \cos \alpha \cdot \sin x + \frac{1}{3} \cdot \cos 3\alpha \cdot \sin 3x + \frac{1}{5} \cdot \cos 5\alpha \cdot \sin 5x + \dots \right)$$

hvor  $\cos \alpha$  er en konstant, afhængig af ensretterens indstilling (tændvinkel)

For en 6-puls koblet ensretter beskriver formlen fasestrømmen, såfremt  $\alpha$  indsættes som  $2\pi/3$  og  $a$  som topværdien:

$$I_{Tot} = k \cdot I_1 \left( \sin(x) + \frac{1}{5} \cdot \sin(5x) + \frac{1}{7} \cdot \sin(7x) + \frac{1}{11} \cdot \sin(11x) + \dots \right)$$

Dette betyder, at de harmoniske strømme på en ensretter har ordenstallet  $h$ :

$$h = H \cdot p \pm 1$$

hvor  $H$  er et heltal (1, 2, 3, 4, 5, ...) og  $p$  er pulstallet på den aktuelle ensretter.

Ved  $p = 6$  bliver  $h = 5-7, 11-13, 17-19, \dots$  Amplituden er teoretisk grundtonen divideret med den aktuelle tones ordenstal, dvs.  $I_h = I_1:h$ .



## Formler

Den totale harmoniske forvrængning THD af en spænding eller en strøm udtrykkes ved grundtonen ( $U_1$ , hhv.  $I_1$ ) og de overharmoniske spændinger og strømme ( $U_2$ ,  $U_3$  osv, hhv.  $I_2$ ,  $I_3$  osv.):

$$THDU = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots}}{U_1} \cdot 100\%$$

$$THDI = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} \cdot 100\%$$

Elselskaberne (ledningsejerne) er interesseret i at nedbringe den harmoniske strømbelastning i forsyningsnettet til et minimum, idet alle overtoner summeres efter formlen:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots}$$

Alle de harmoniske strømme medvirker dermed til strømvarmetabet i fordelingsnettet og til forvrængning af spændingens sinuskurve. Et yderligere problem er, at der ved større spændingsforvrængning opstår mulighed for resonans vilkårlige steder i nettet, hvor der findes en kapacitiv last.

## 2.3 Regler

I tilfælde hvor forvrængningen er udefra kommende, vil elforsyningselskabet henvise til DEFU's Rekommandation nr. 16 og 21 for hhv. lavspænding og mellemspænding. Såfremt disse er overholdt, overlades det til forbrugeren at løse problemet. Er rekommandationen overtrådt, kan elforsyningselskabet være mere imødekommende, men der skal gøres opmærksom på, at rekommandation kan oversættes til anbefaling og skal forstås således.

Hvis det konstateres, at overtonerne skabes hos forbrugeren, kan elforsyningselskabet kræve, at de nedbringes til et niveau, der svarer til DEFU's komitérapport nr. 110, der udelukkende beskæftiger sig med harmonisk forvrængning på lavspændingsnettet. Et sådant krav kan indebære store omkostninger for forbrugeren, men der findes flere alternativer, som kan benyttes, alt efter problemets størrelse og virkning.

## 3. Den harmoniske forvrængnings indflydelse på energieffektiviteten

### 3.1 Generelt

Den alment gældende formel for effekt er:

$$P_{Tot} = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 + U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + U_3 \cdot I_3 \cdot \cos \varphi_3 + \dots$$

Det er denne effekt  $P_{tot}$ , der måles i elmåleren, og det er den, der betales for.

Generelt medfører de harmoniske øgede tab i installationerne. Nedenfor listes nogle forhold, der forøger tabeffekten i installationerne:

- Øgede magnetiseringstab i alt jern
- Forhøjede peakværdier af magnetiseringsstrøm
- Forhøjet strøm i alle lysgrupper, der indeholder fasekompensering
- Forhøjet nulstrøm ved lysregulering (3. harmonisk)
- Reduceret virkningsgrad på udstyr på grund af ovenstående ulemper

(Den 3. harmoniske er ikke udbredt i fordelingsnettet, men den findes internt i installationerne, hvor den summerer sig i nullederen. Her vil den - kvadratisk sammenlagt med nulstrømmen i øvrigt - belaste nullederen. I sjældne tilfælde med f.eks. snitfasestyrede lysanlæg kan nulstrømmen blive væsentligt større end fasestrømmen. Det må dog betragtes som et vigende problem, idet thyristoriserede snitfasestyrenger er på vej til at blive historie.

Skulle der forekomme 3. harmonisk spænding i 3-fase spændingen, vil den i roterende maskiner udelukkende føre til tab, idet der ikke forekommer noget drejefelt.)

### 3.2 Asynkronmotoren

De harmoniske medfører øgede tab i asynkronmotoren som følge af:

- ekstra strømvarmetab i statorviklingen (herunder tab fra peakstømme som følge af mætning i jernet)
- strømvarmetab i rotoren
- magnetiseringstab i rotoren
- pulserende eller reduceret drejningsmoment

Strømvarmetabet i statorviklingerne kan beregnes som:

$$\Delta P = 3 * R_{f-m} (i_1^2 + i_3^2 + i_5^2 + i_7^2 \dots)$$

hvor tabene  $\Delta Ph = 3 * R_{f-m} (i_3^2 + i_5^2 + i_7^2 \dots)$  skyldes de overharmoniske strømme.

$R_{f-m}$  refererer til modstandsmåling fase – midtpunkt.

Indeholder spændingen lave harmoniske med væsentlig amplitude, kan statorjernet gå i mætning og peakstrømmen blive meget stor med deraf følgende ekstra stort strømvarmetab i stator. Men de høje frekvenser vil ikke give anledning til væsentlige magnetiseringstab, idet de harmoniske spændinger er lave og frekvensen mange gange over grundtonen (50 Hz).

Anderledes ser det ud i rotoren. Med ren sinusformet strøm udsættes rotoren for en meget lav frekvens på 1-5% af netfrekvensen eller 0,5 til 2,5 Hz, afhængig af motorens størrelse. Derfor må der regnes med betydelige tab, når der induceres overharmoniske felter i rotoren. Vi er ikke bekendte med målinger heraf, men det må formodes, at i hvert fald de lave overharmoniske strømme i statoren vil inducere felter i rotoren, der vil afbrændes til varme her, igen med en reduktion af virkningsgraden til følge.

Idet den 5., 11., 17. osv. harmoniske vil have den modsatte fasefølge af grundtonen, kan man forestille sig, at disse vil forsøge at dreje rotoren den modsatte vej. I litt. 1 anføres da også, at de to hovedproblemer med harmoniske i rotoren er, at rotoren bliver varm samt at

drejningsmomentet reduceres eller bliver pulserende. Den 7., 13. osv. harmoniske derimod har samme omdrejningsretning som grundtonen og tillægger derfor et moment til grundtonens.

Motorer, der er forsynet fra frekvensomformere, påvirkes naturligvis ikke af de harmoniske på nettet. Det gør udelukkende motorer direkte på nettet. Men frekvensomformeren er på grund af dens ensretter en stor generator af harmoniske strømme, og den skaber derfor mange harmoniske problemer i det net, den forsynes fra.

### 3.3 Jævnstrømsmotorer

Regulerbare jævnstrømsmotorer vil ved drift på vekselstrømsnet altid være forsynet med ensretter. Som beskrevet for frekvensomformeren ovenfor påvirkes motoren ikke af nettets harmoniske, men ensretteren vil skabe harmoniske problemer i forsyningsnettet.

### 3.4 Transformere

De ekstra tab i transformerenes viklinger som følge af harmoniske strømme er som i motorer:

$$\Delta P = 3 \cdot R_f \cdot (I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 \dots)$$

Transformere stresses meget af overharmoniske strømme, idet kræfterne, der påvirker viklinger, strømførende beslag og tilslutninger, er proportionale med strømmens peakværdi. Indeholder spændingen harmoniske med væsentlige amplituder, kan transformernettet gå i mætning, og dermed kan peakværdien af magnetiseringsstrømmen blive så stor, at transformeren må derates.

### 3.5 Kabler

Ved kabelanlæg er tabseffekten på grund af de harmoniske:

$$\Delta P = 3 \cdot R_f \cdot (I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 \dots)$$

### 3.6 Et eksempel

I 10 kV forsyningen er der målt de i tabel 1 viste strømme og spændinger. På basis af målingerne er effekten i de overharmoniske, dP, beregnet. (dP i tabel 1 er beregnet med  $\cos\phi$  lig 1, idet  $\cos\phi$  ikke er målt for de harmoniske værdier).

h	1	3	5	7	9	11	13	17	19	23	25	THD
I1	100	0,69	18,74	5,87	0,2	3,67	1,83	1,16	0,97	0,51	0,49	<b>20,18</b>
I2	100	0,65	18,88	6,01	0,18	3,63	1,91	1,25	0,89	0,54	0,48	<b>20,37</b>
I3	100	0,46	18,99	5,91	0,23	3,67	1,99	1,3	0,88	0,45	0,45	<b>20,45</b>
U1	100	0,11	2,33	0,83	0,03	0,8	0,38	0,19	0,11	0,13	0,07	<b>2,66</b>
U2	100	0,03	2,42	0,82	0,02	0,81	0,39	0,22	0,11	0,13	0,07	<b>2,74</b>
U3	100	0,08	2,35	0,78	0,04	0,78	0,31	0,25	0,08	0,16	0,12	<b>2,65</b>
$\Delta P$ [kW]		0,01	6,57	0,71	0,00	0,43	0,10	0,04	0,01	0,01	0,01	7,88

Tabel 1. Målte harmoniske strømme og spændinger i procent af grundtonen samt beregnede effekter

Fasestrøm og spænding målt til :

I = 83 A og U = 10,23 kV,

hvilket giver en tilsyneladende effekt  $S = \sqrt{3} * U * I = \sqrt{3} * 83 * 10,23 = 1483 \text{ kVA}$

$\text{Cos}\phi$  skønnes til 0,8, og dermed bliver  $P = 1483 * 0,8 = 1186 \text{ kW}$

$$\frac{\Delta P}{P} \% = \frac{7,88 * 100\%}{1186} = 0,67\%$$

$\Delta P$  udtrykker tabseffekten, hvis alle harmoniske blev brændt af som spildvarme. Det gør de naturligvis ikke, idet alle termiske apparater varmer ligeså godt med harmonisk effekt som med grundtonen. Derimod skaber de harmoniske strømme andre steder varme, der sænker virkningsgraden af apparaterne. Derfor skal der tilføres ekstra grundtone- strøm for at kompensere for den lavere virkningsgrad.

Hvis det for regnestykkets skyld forudsættes, at et aktivt filter kan fjerne alle tabene, bliver det på årsbasis:

$$\Delta E = 0,67\% * P * t = 0,67\% * 1186 * 8760 = 69.000 \text{ kWh/år}$$

Ved en elpris på 0,60 kr./kWh svarer det til 41.000 kr./år. En THDI på ca. 20,4% (tabel 1) svarer til 16.9 A på 10 kV niveau og 422 A på lavspændingsniveau. Filteret bør være ca. 30% større, dvs. på 550 A. Investeringen anslås til 550.000 kr., og dermed bliver tilbagebetalingstiden 13 år. Den lange tilbagebetalingstid skal ses i lyset af, at THDU blot er ca. 2,7%.

Ud over elbesparelsen kan der være andre fordele ved aktive filtre. De kan være svære at opgøre konkret, men f.eks. kan de bestå i mindsket behov for vedligehold, længere drifttid under havarier og uforklarlige produktionsforstyrrelser og længere levetid af udstyret.

#### 4. Omfanget af harmonisk forvrængning i dansk industri

Som led i forundersøgelsen er de harmoniske forvrængninger blevet målt i 10 virksomheder. De 10 virksomheder er vist i tabel 2. Virksomhederne vurderes alle at have en betydelig mængde motorinstallationer, hvoraf en større andel forsynes via frekvensomformere. De valgte virksomheder repræsenterer et bredt udsnit af forskellige brancher.

Kunde	Adresse	postnr	By
Ardagh Glass Holmegaard A/S	Glasværksvej 52	4684	Holme-Olstrup
Akzo Nobel Salt A/S	Hadsundvej 17	9550	Mariager
Abena A/S	Egelund 35	6200	Åbenrå
Lynettefællesskabet I/S	Refshalevej 250	1432	Kbh K.
LEGO Systems A/S	Åstedvej 1	7190	Billund
Kommunekemi A/S	Lindholmvej 3	5800	Nyborg
Cheminova A/S	Thyborønvej 78	7673	Harbøre
Novozymes A/S	Nordre Fasanvej 215	2000	Frederiksberg
Færch Plast A/S	Rasmus Færchs Vej 1	7500	Holstebro
Haldor Topsøe A/S	Linderupvej 2	3600	Frederikssund

Tabel 2. De 10 virksomheder, hvor der som led i forundersøgelsen er målt på harmonisk forvrængning i lavspændingsinstallationerne

## 4.1 Måleresultater

Måleresultaterne for de 10 virksomheder er i forenklet version vist i bilag 2. Målerapporter i komplet format findes hos projektdeltagerne. De i bilag 2 angivne data er et repræsentativt udsnit af de målinger, der er foretaget hos virksomhederne, og er typiske middelværdier.

I tabel 3 er måleresultaterne for de ti virksomheder og en række andre virksomheder – for hvilke der tidligere er målt harmoniske forvrængning - vist i forenklet form.

*Forklaring til tabel 3:*

THDU: Harmonisk spændingsforstyrrelse angivet som % af grundtone spændingen

THDI: Harmonisk strømforstyrrelse angivet som % af grundtone strømmen

THDI 5.: Den 5. harmoniske strøm angivet som % af grundtone strømmen

Irms: Summen af alle strømme (inkl. harmoniske strømme)

kVA: samlet effekt (inkl. harmoniske bidrag) (S)

kW: aktiv effekt (inkl. harmoniske bidrag) (P)

kvar: reaktiv effekt (inkl. harmoniske bidrag)

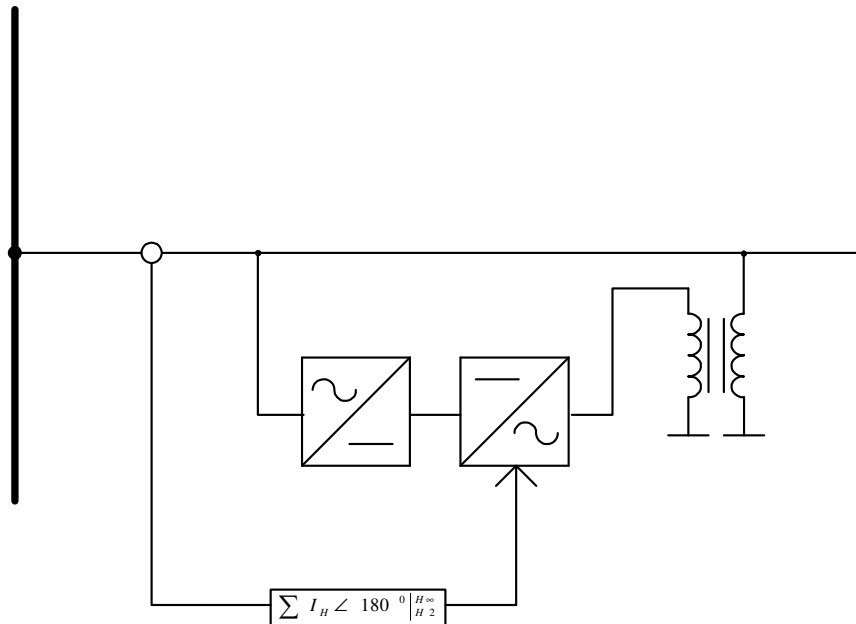
Cos  $\Phi$ : effektfaktor med relation til grundtonen (P1:S1)

PF: effektfaktor inkl. harmoniske bidrag (P:S)

De grønne og gule markeringer angiver ABB's vurdering af, i hvilke installationer det er mest sandsynligt at opnå energibesparelser med aktive filtre. Vurderingen er foretaget med udgangspunkt i ABB's erfaringer fra lignende installationer samt installationens tekniske sammensætning, THDU, strøm og benyttelsestid.

Applikation	målepunkt	dato	THDU	THDI	THDI 5.	Irms	kVA	kW	KVAr	CosFI	PF
Affaldsforbrænding	Hoved tavle	08.01.08	6,0%	20,0%	19,0%	900	650	550	300	0,91	0,89
Hospital	Røntgen tavle	29.10.07	2,5%	24,0%	18,0%	110	80	72	32	0,94	0,91
Hospital	Røntgen tavle	01.11.07	3,0%	10,0%	5,0%	250	190	175	75	0,91	
???	???	22.05.07	6,6%	23,0%	22,0%	1.430	1.030	980	320		0,95
Havnekran	Kran inst.	15.11.06	11,0%	25,0%	24,0%	200	163	73	145		0,45
Papirfabrik	kraftcentral	29.04.08	4,9%	14,0%	13,0%	2.300	1.600	1.450	650	0,93	0,91
Malt forarbejdning	Ventilatorer 690V	18.10.07	5,9%	29,0%	28,0%	1.480	1.020	940	400	0,95	0,92
Printmaskiner	Hovedtavle	08.08.08	4,0%	50,0%	42,0%	400	265	230	135	0,96	0,86
Kraftvarmeværk	Hovedtavle	16.02.09	2,6%	21,0%	19,0%	800	520	480	250	0,9	0,88
Hjul produktion	svejs maskiner	25.02.08	1,5%	4,0%	3,0%	1.500	1.000	750	700	0,72	0,72
Ventilator	DC-drev	15.01.09	12,0%	32,0%	30,0%	1.550	1.050	500	950	0,53	0,5
Gulvbrædder	AC-drev	28.06.07	4,0%	15,0%	13,0%	750	520	480	200	0,96	0,93
Affaldsforbrænding	AC-drev 690V	28.04.08	7,8%	31,0%	29,0%	850	1.000	950	350		0,94
Køkkenlåde fabrik	Hovedtavle	22.01.08	5,0%	20,0%	18,0%	375	250	240	70	0,98	0,96
Kabel produktion	Hovedtavle	03.06.08	5,0%	16,0%	14,0%	500	330	240	240		0,72
Isolering	Hovedtavle	17.11.08	5,2%	29,0%	28,0%	450	315	280	130	0,95	0,91
Ventilation	???	28.03.08	4,2%	14,0%	12,0%	850	600	580	160	0,97	0,96
Omrører	Hovedtavle	17.02.09	6,1%	33,0%	30,0%	690	470	440	180	0,97	0,92
Fjernvarmepumper 690V	Hovedtavle	29.09.08	5,7%	40,0%	38,0%	600	720	650	300	0,98	0,91
Ovndrev DC	???	30.08.06	13,0%	32,0%	30,0%	770	500	200	465	0,42	0,39
Valsepresse AC	???	30.08.06	9,3%	30,0%	28,0%	750	510	470	200	0,98	0,92
Kontorhus	Hovedtavle	11.03.09	4,2%	12,0%	3,0%	400	270	275	(35)	-0,99	-0,98
Højlager	Hovedtavle	27.05.09	6,0%	35,0%	28,0%	300	200	200	(20)	1	-0,94
Kontorhus	Hovedtavle	09.03.09	3,5%	20,0%	5,0%	140	93	90	(17)	-0,98	-0,96
Glasproduktion	Tavle K	17.03.09	4,0%	27,0%	23,0%	600	420	380	170	0,94	0,90
Glasproduktion	Tavle Ø	17.03.09	3,6%	16,0%	13,0%	580	400	350	185	0,90	0,88
2F tyristor "Gas-boost"	Trafo V ( 230V 2F )	17.03.10	6,8%	21,0%	10,0%	2.200	530	470	250	0,91	0,88
Saltproduktion	Tavle 3M1	23.03.09	5,6%	19,0%	17,0%	1.050	720	660	270	0,94	0,93
Pumpeanlæg	Tavle 20M2	23.03.09	3,2%	47,0%	42,0%	225	160	145	73	0,99	0,89
Ble maskine	Tavle M10	24.03.09	4,8%	13,0%	12,0%	620	410	380	155	0,93	0,92
Lager	Tavle H5.1	24.03.09	3,3%	18,0%	15,0%	200	120	90	70	0,79	0,76
Regnvands pumper	Trafo 2	24.03.09	2,9%	39,0%	35,0%	330	205	224	90	0,97	0,92
Pakke hal	Tavle 23-04	16.04.09	4,0%	23,0%	5,0%	190	130	120	50	0,94	0,91
Plast støbe maskiner	Tavle 99-08	16.04.09	1,8%	6,0%	3,0%	500	350	315	150	0,90	0,90
Kemisk process	Trafo F3	22.04.09	4,7%	22,0%	19,0%	650	450	420	160	0,96	0,93

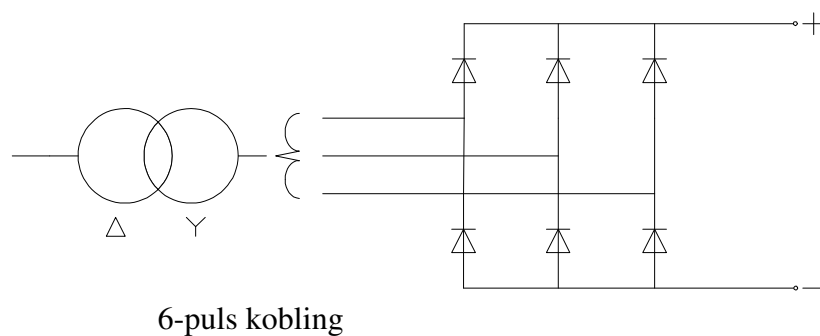


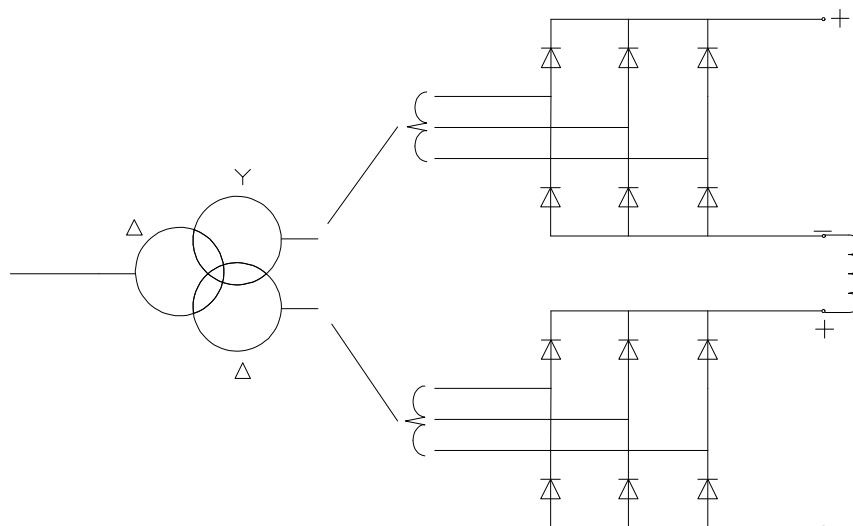


Figur 2. Principtegning af aktivt filter

## 5.2 Forebyggelse af problemer med harmonisk forvrængning

Ved meget store motorinstallationer eller anden ulineær belastning (effekter over ca. 500kW) kan det i projekteringsfasen anbefales at tage hensyn til disse belastninger for derved at sikre, at der ikke senere opstår harmoniske problemer. Ved at forebygge problemet bliver der kun tale om en meget lille meromkostning. Hvis en virksomhed har f. eks. store køleanlæg med frekvensregulerede kompressormotorer, vil det være fornuftigt at dele disse store frekvensregulerbare drev på forsyningstransformere med forskellige koblingsgrupper. Planlægges det under projekteringsforløbet, vil en eventuel omkostning til 12-puls ensrettere kunne spares, idet to 6-puls grupper, koblet via forsyningstransformeren som vist i figur 3, af nettet ses som en 12-puls gruppe.





12-puls kobling

Figur 3. To 6-puls koblinger, forsynet så de svarer til en 12-puls kobling hvad harmoniske forstyrrelser angår

### 5.3 Fasekompensering

Kombinationen fasekompensering og harmonisk forvrængning er meget dårlig, og giver tit forbrugere store problemer. Ved installation af fasekompensering er det derfor en rigtig god ide at kontrollere installationen for harmoniske i spændingen, se i øvrigt DEFU rekommandation nr. 16 afsnit 3.11 og 4.7.

Såfremt det skønnes, at der er fare for resonans, kan dette imødegås ved ”forstemning” af fasekompenseringsanlægget. Forstemningen betyder, at resonanspunktet flyttes udenfor det farlige område ved, at der monteres en lille spole på hver kondensator. Det er oftest ikke muligt at foretage denne montage efter at anlægget er opstillet, idet spændingen over den enkelte kondensator forhøjes ved forstemning, og kondensatorerne er normalt ikke lagt ud for den forhøjede spænding. Hvis der i installationen findes UPS og/eller reservekraftforsyning skal der hvis der benyttes forstemning tages hensyn dertil.

Hvis der ikke tages højde for resonans problematikken, og der senere opstår resonans, vil dette vise sig som meget store overstrømme ved en overharmonisk frekvens. Strømmene er ikke nødvendigvis stationære, men følger den harmoniske forvrængnings størrelse.

### 5.4 UPS og reservekraft

UPS anlæg kan benyttes til sikring af et forsyningsafsnit mod gener af harmonisk forvrængning. Det skal bemærkes, at såfremt der er behov for bypass til net via den statiske switch vil det øvrige nets kvalitet overføres direkte.

Kortslutningsimpedansen er en meget vigtig faktor i den harmoniske spændingsforvrængning. En halvering af en given kortslutningseffekt på nettet vil give den dobbelte spændingsforvrængning. Det er forklaringen på, at den maksimale harmoniske strøm i bl. a. DEFU



komiterapport nr. 110 er relateret til kortslutningsstrømmen det pågældende sted i installationen.

Det er vigtigt at være opmærksom på kortslutningsimpedansen, når der installeres reservekraftanlæg som f.eks. dieselgenerator. Hvis der er benyttet en xx kVA transformere som forsyningskilde, vil der med en standard generator på xx kVA opstå en harmonisk forvrængning på overslagsmæssigt det 3-dobbelte af nettets forvrængning, når samme belastning kobles på generatoren.

Ved samtidig benyttelse af UPS anlæg skal det nævnes, at det i dag er muligt af købe UPS anlæg med meget lav TDHI, hvilket naturligvis nedsætter spændingsforvrængningen.

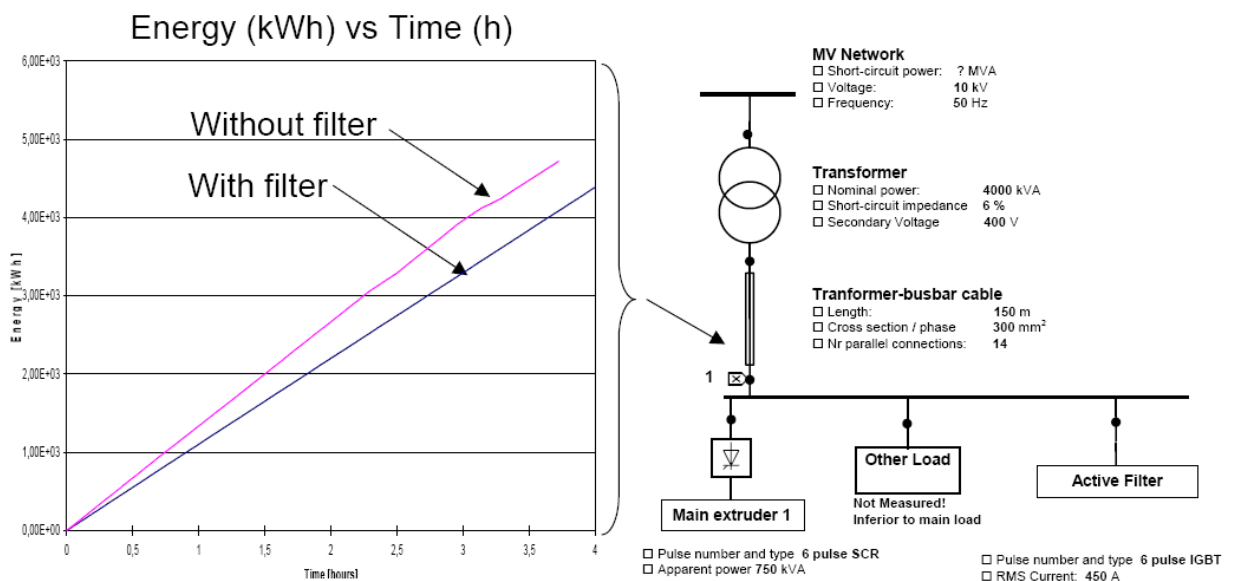
## 6. Energibesparelser i industrien ved reduktion af de harmoniske

### 6.1 Eksempler på energibesparelser opnået med anvendelse af aktive filtre

En litteratur-søgning har kun resulteret i ganske få eksempler på energibesparelser ved reduktion af de harmoniske spændinger (THDU) i elforsyningen til produktionsanlæg. Det beskedne resultat kan dels skyldes, at de harmoniske hidtil primært er blevet reduceret for at undgå overbelastede komponenter og dårligt fungerende apparater, og dels, at det er meget vanskeligt af eftervise besparelser i et industrielt miljø, hvor elforbruget påvirkes af mange forskellige faktorer, hvoraf spændingskvaliteten kun er en enkelt og måske en mindre faktor.

#### 6.1.1 Elbesparelser på ekstruderlinie

Det belgiske firma Labo Lemcko har for ABB målt på elforsyningen til en plast-ekstruderlinie (litt. 2). Elforbruget er målt skiftevis med et aktivt filter (ABB PQFI 450 A) og uden (hvor filteret bypasses). Målingerne omfatter dels hele ekstruderliniens elforbrug og dels elforbruget til komponenter som asynkronmotorer, jævnstrømsmotorer m.m. Uden filteret optager linien 1200 – 1400 kW, hvoraf 30 – 50% synes at gå til asynkronmotorer, mens resten går til jævnstrømsmotorer, elvarmelegemer m.m. (elforbrugets fordeling på komponenter er ikke oplyst i litt. 1).



Figur 4. Ekstruderlinien og eksempel på måling med og uden filter

Elforsyningsanlægget er skitseret i figur 4, hvor der også er vist en af målingerne i form af elforbruget som funktion af produktionstiden ved produktion med og uden filter (produktet og produktionsmængden har været den samme under de to målinger). Resultaterne af Labo Lemckos målinger er sammenfattet i tabel 4, hvor omfanget af forstyrrelser er angivet ved THDU og THDI (THDI anført som Ampere). Måleperioderne er i alle tilfælde ca. 3½ time. Ud over de i tabel 4 viste målinger er der også målt på komponenter som ekstrudervarme og oliekedel, idet varmebehovet varierer meget og indgår i ekstruderliniens samlede elforbrug. De to varmemeforbrugere består af elvarmelegemer, hvis effektivitet ikke påvirkes af de harmoniske spændinger.

Anlæg	Belastning uden filter kW	Produktion ved måling med filter ift. uden	Harmoniske uden filter		Harmoniske med filter		Fald i elforbrug m. filter %
			THDU %	THDI A	THDU %	THDI A	
Ekstruderlinie	1230	Uændret	7,26	370	4,67	274	14
	1410	Større fibertykkelse	6,52	338	3,86	135	6
	1200	Større fibertykkelse	7,39	432	4,73	251	-1
	1120 (som ovenfor, blot uden elkedel)	-se og større produktion					6
Asynkronmotorer, direkte forsynede	210	Større fibertykkelse	6,74	43,5	4,35	24,4	16
Asynkronmotorer med frekvensomf.	52	-se	6,62	56,9	4,25	57,2	6
Jævnstrømsmotorer inkl. ensrettere	240	Uændret					-1

Tabel 4. Ændring i elforbruget til ekstruderlinien og til udvalgte komponenter med aktivt filter i forhold til uden.

Af tabel 4 ses, at to af de tre målinger på ekstruderliniens samlede elforbrug viser en besparelse på henholdsvis 14% og 6%, mens den tredje måling viser et merforbrug på 1%. Korrigeres sidstnævnte måling for oliekedlens elforbrug, bliver resultatet en 6% besparelse ved drift af ekstruderlinien med det aktive filter i forhold til uden filter.

Ud over målingerne på ekstruderliniens samlede elforbrug er der også målt på enkeltkomponenter. Tabel 4 viser en besparelse på 16% for en gruppe direkte forsynede asynkronmotorer, og 6% for en gruppe asynkronmotorer, der forsynes via frekvensomformer (teoretisk skulle besparelsen være 0, idet frekvensomformerne adskiller net og motorer elektrisk). I begge tilfælde har fibertykkelsen været noget større under filterdrift end ellers, og det har formentlig

trukket lidt ned i besparelserne. Målinger på ekstruderens jævnstrømsmotor viser et lidt øget elforbrug ved filterdrift, men uændret virkningsgrad for ensretteren.

Labo Lemcko har også målt på selve det aktive filter, tabel 5. Filterets egetforbrug er 7,1 kW, når det er i drift, og 0,5 kW når det bypasses. (Filterets elforbrug indgår i målingerne for hele ekstruderlinien, men ikke i målingerne af komponenterne).

Bypass af aktiv filter			Aktiv filter i drift		
THDU, %	HD, A	Optagen effekt, kW	THDU, %	HD, A	Optagen effekt, kW
6,39	0,2	0,5	3,72	433	7,1

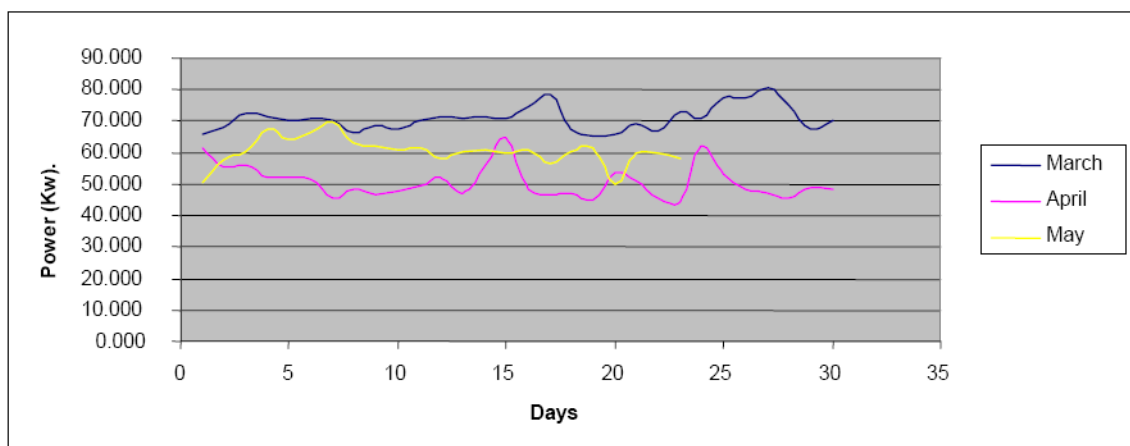
Tabel 5. Elforbrug til det aktive filter

Tabene i transformeren og lavspændingskablerne indgår ikke i tabel 4, men er opgjort at være i alt 3,5 kW (34%) mindre med filteret i drift end uden.

Der kan kun med forsigtighed drages en konklusion på disse målinger, idet der mangler oplysninger om forbrugets fordeling på forskellige motorer, elvarmelegemer m.m. Den mest brugbare måling synes at være den på de direkte forsynede asynkronmotorer, hvor elbesparelsen opgjordes til 16%. Hvis de 16% holder stik, og hvis hovedparten af ekstruderliniens øvrige belastninger ikke påvirkes af filteret (fordi det er motorer, der forsynes fra en frekvensomformer eller en ensretter eller er termiske belastninger), virker en samlet elbesparelse for hele linien på 6% rimelig, mens den målte besparelse på 14% må skyldes flere forhold end blot filteret.

### 6.1.2 Papirmaskine

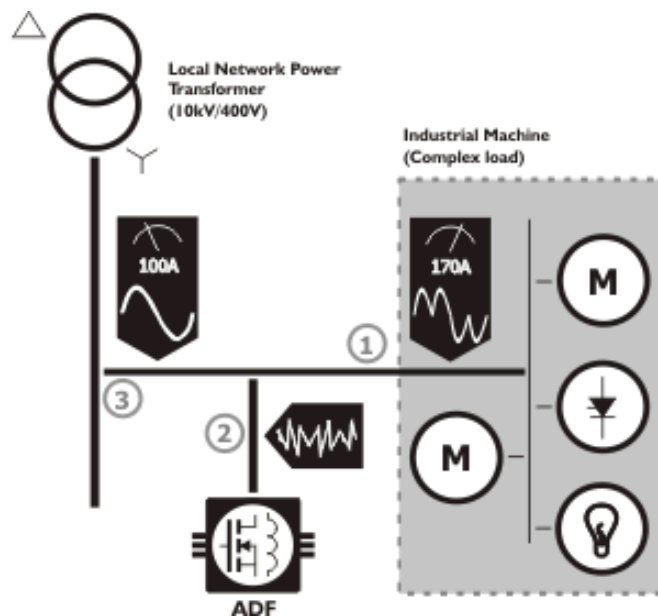
En papirmaskine med en stor andel asynkronmotorer er blevet drevet i en måned uden filter og i en måned med filter (litt. 3). Figur 5 viser elforbruget (kWh pr. døgn?) i de to måneder. Umiddelbart kunne det se ud, som om der er opnået en elbesparelse på 20-30%, men papirfabrikken angiver selv besparelsen med det aktive filter til i gennemsnit 10%. Der er ingen oplysninger om omfanget af de harmoniske.



Figur 5. Papirmaskinens optagne effekt uden (marts) og med (april) aktivt filter

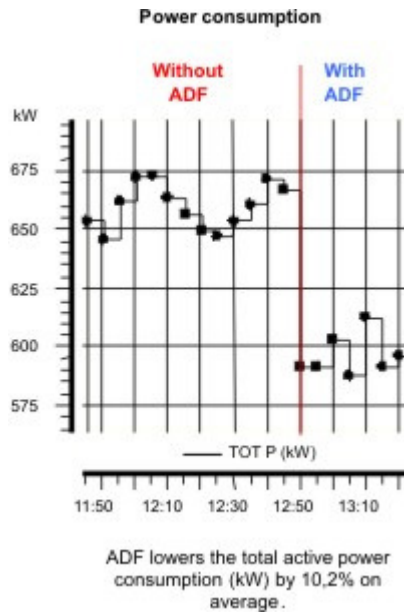
### 6.1.3 Svenske virksomheder

Det svenske firma Comsys beskriver på hjemmesiden (litt. 4) en række installationer med deres ADF (et aktivt filter, som betegnes som en computerstyret strømgenerator, der kan producere en vilkårlig strømcurve). Den principielle funktion af filteret er vist i fig. 6. Nedenstående beskrivelser er baseret på hjemmesiden samt på et besøg hos Comsys i juni 2009.



Figur 6. Principtegning af filtrering af harmoniske med Comsys ADF

Tetra Pak i Lund har en 900 kVA ADF på en pakkemaskine, hvor THDU før var ca. 8%. Tetra Pak har ved at køre med ensartet produktion og skiftevis indkoble og udkoble filteret opgjort elbesparelsen til 10,2 %. Tilbagebetalingstiden er opgjort til 1,8 år i kraft af elbesparelsen (elpris 0,50 SEK/kWh). Hertil kommer fordele som forlænget levetid af udstyret, mindre risiko for stop, øget kapacitet på transformeren og stabiliseret netspænding. Tetra Pak undersøger nu, om alle de pakkemaskiner, de har leveret, skal udstyres med filter.



Figur 7. Effektoptaget til Tetra Paks maskine uden og med aktivt filter

LKAB i Kiruna har installeret en 500 kVA ADF i deres mølteri. Elforbruget er reduceret med 4 % og produktionen er øget 8,5%. Samtidig er udstyrets opetid øget.

Hos Volvo på Olufstöm fabrikken er der installeret en 600 kVA ADF i forsyningen til en 800 kW presse. Elbesparelsen er opgjort til 2,3%, mens eludgifterne grundet bedre effektfaktor er reduceret 5,3%. Tilbagebetalingstiden angives til 1,3 år.

I Göteborg fik GRYAAB rensningsanlægget installeret 17 pumper med frekvensomformere. I nettet sad allerede en UPS, og kombinationen af frekvensomformere og UPS'ens ensretter skabte en overtone, som – ved større pumpebelastninger – satte edb-styringen ud af drift. To 600 kVA filtre løste problemet, så anlægget igen kunne rense med fuld kapacitet.

Hos Sandviken er et ADF installeret i forbindelse med en lysbueovn. Tilbagebetalingstiden er opgjort til 36 måneder, hvis kun elbesparelsen medregnes, og 9 måneder, når øvrige fordele som mindre slitage af elektroder, mindre slid på ovne og øget produktivitet medregnes.

Af andre anlæg, hvor aktive filtre kan være interessante, nævner Comsys kraner, svejsning, lys, ventilation, vindmøller (resonans, flicker), elevatorer, datacentre og UPS'er. Comsys vurderer, at problemet med spændingskvalitet er voksende, fordi nettet bliver svagere, og der kommer flere forstyrrelse fra vindmøller, elbil-opladere m.m.

## 6.2 Vurdering af sparepotentialet i dansk industri

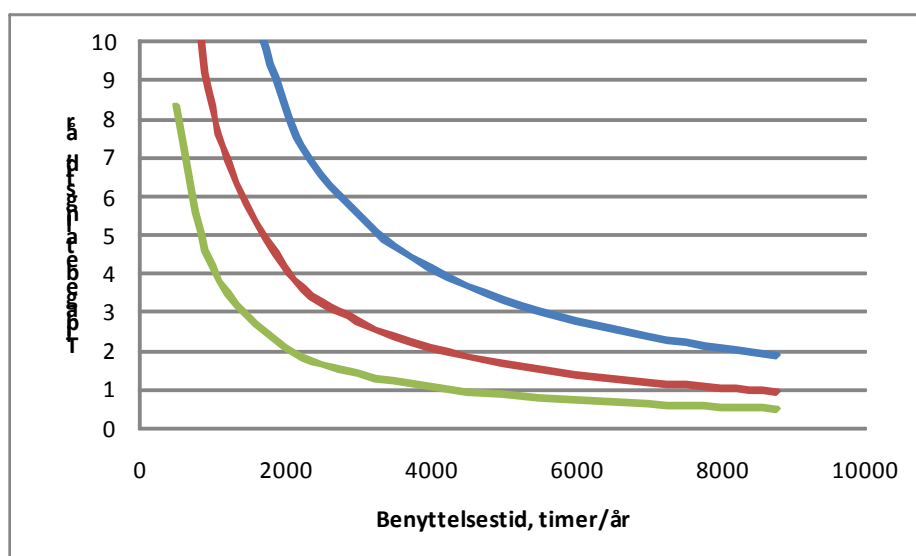
På den belgiske plast-ekstruderlinie (afsnit 6.1.1) med en THDU på ca. 7% tjente det aktive filter sig hjem på 1 år, alene i kraft af elbesparelserne. Desværre har der ikke kunnet fremskaffes oplysninger om THDU i de svenske installationer (afsnit 6.1.3), men for tre af installationerne anføres en tilbagebetalingstid alene i kraft af elbesparelserne på fra 1,3 til 3,0 år.

Det er ABB's erfaring, at et aktivt filter kan resultere i væsentlige elbesparelser i installationer, hvor THDU er mindst 5-6%. Det kan imidlertid være svært for en leverandør af aktive filtre at garantere en hvis elbesparelse, og derfor må der også inddrages andre fordele som:

- Nedsættelse af havarifrekvens på produktionsmaskiner og derved nedsættelse af antal produktionsstop.
- Nedsættelse af antal uforklarlige nedbrud i anlæg og systemer, som er tilsluttet et net med megen harmonisk forvrængning.
- Forøget kapacitet for det elektrisk udstyr, idet det ikke skal derates som følge af overharmoniske

Af installationerne i tabel 3 er det ABB's erfarings-baserede opfattelse, at der i ca. 40% er et sandsynligt eller muligt potentiale for elbesparelser ved reduktion af THDU. Målingerne i tabel 3 er udført på installationer, der forventedes at være interessante, og derfor er de 40% ikke repræsentativt for dansk industri, men er reduktion af THDU vil måske være interessant i 10-20% af alle installationer. Baseret på de i afsnit 6.1 refererede besparelser antages det, at der i disse installationer kan opnås en elbesparelse på 4%. Besparelsen opnås primært i direkte forsynede elmotorer. I erhvervslivet er elforbruget i motorer ca. 11.000 GWh/år (litt. 5), og heraf anslås ca. 7.000 GWh/år at være i direkte forsynede elmotorer. Potentialet for elbesparelser i kraft af aktive filtre anslås dermed til  $7.000 \text{ GWh/år} \cdot 0,04 \cdot 0,1$  til  $0,2 = 30-60 \text{ GWh/år}$ .

Fig. 8 viser et eksempel på økonomien ved reduktion af harmoniske med aktive filtre. Der er forudsat en installation med motorbelastninger, hvoraf 50% forsynes direkte og 50% via frekvensomformere. Størrelsen af det aktive filter skal være ca. 0,2 A pr. kW samlet motorbelastning. Investeringen i det aktive filter er ca. 1000 kr./A. Alene værdien af elbesparelserne er medregnet, og der er forudsat en elpris på 600 kr./MWh.



Figur 8. Tilbagebetalingstiden for aktivt filter til reduktion af harmoniske. Tilbagebetalingstiden er opgjort som funktion af installationens benyttelsestid og en procentuel besparelse i den samlede elbelastning på 8% (nederst), 4% og 2% (øverst)

## **7. Litteratur**

1. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. IEEE Std 519-1992
2. Comparative Energy Measurements on an Extrusion Line with and without Active Filtre. Labo Lemcko. 5-6-2006. (Fortroligt – udført for ABB)
3. PQF LV Active Filters: Bringing energy savings to you ... ABB. 2006-06-07
4. [www.comsys.se](http://www.comsys.se)
5. Energibesparelser i erhvervslivet. Delrapport 2. Dansk Energi Analyse og Viegand & Maagøe. April 2009

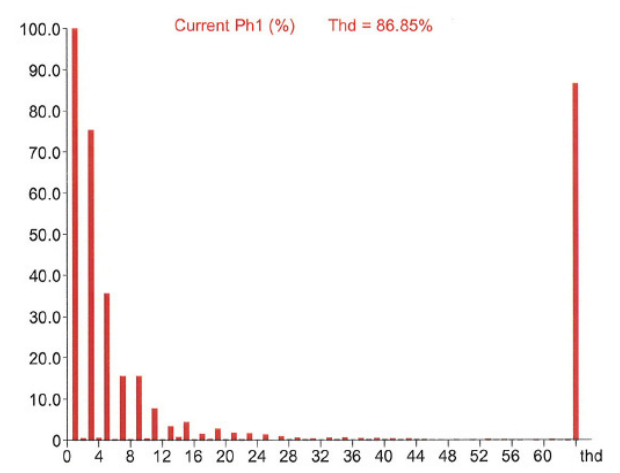
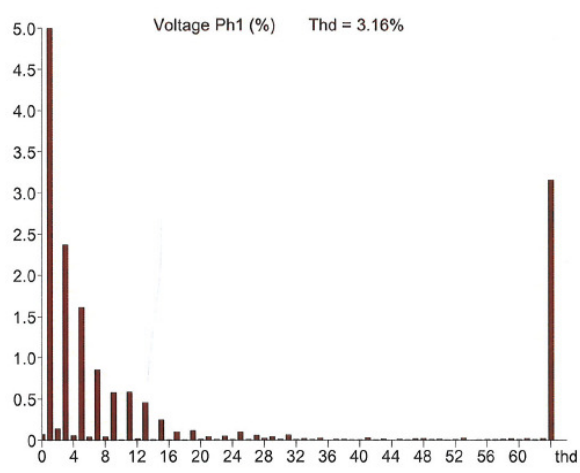
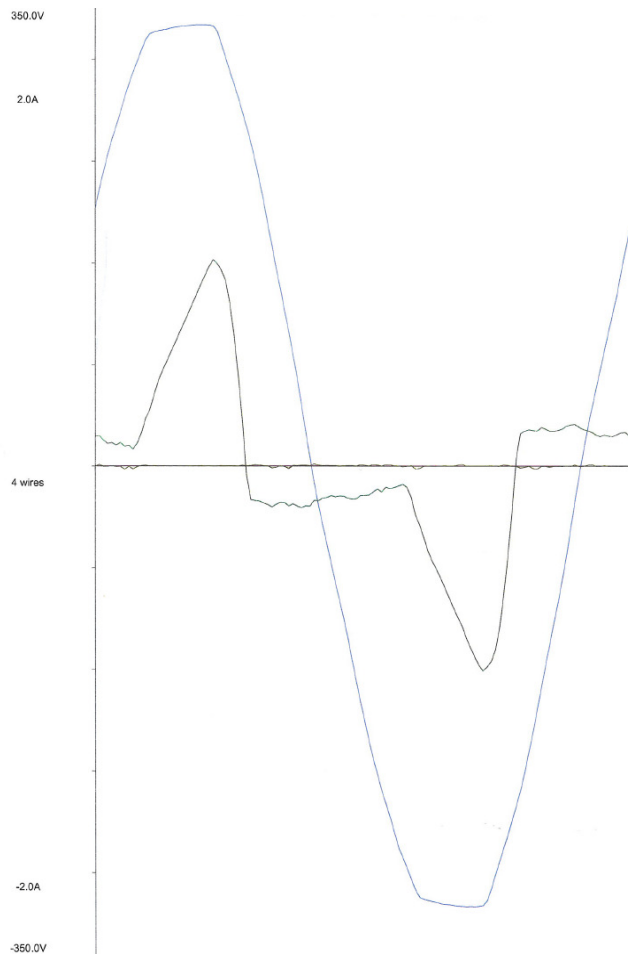
## Bilag 1. Eksempler på strømkurver og harmoniske

På de følgende sider vises strøm- og spændingskurver for en række enfasede apparater, der giver anledning til mange harmoniske i strømmen, samt for en glødepære, der ikke giver problemer. Ud over kurverne er også vist spændingens og strømmens harmoniske fra grundfrekvensen (1. harmoniske, er altid 100%) og opefter.

Apparaterne er:

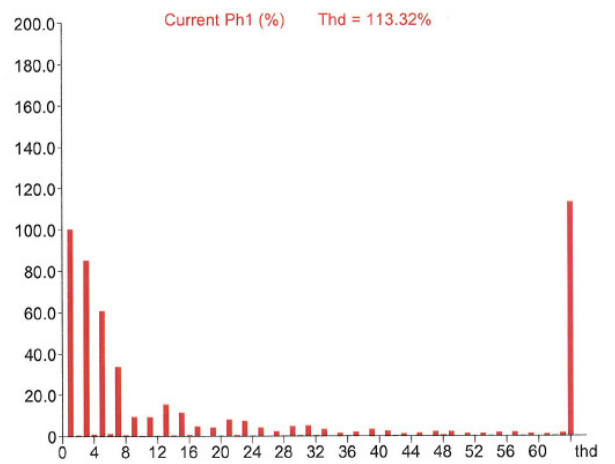
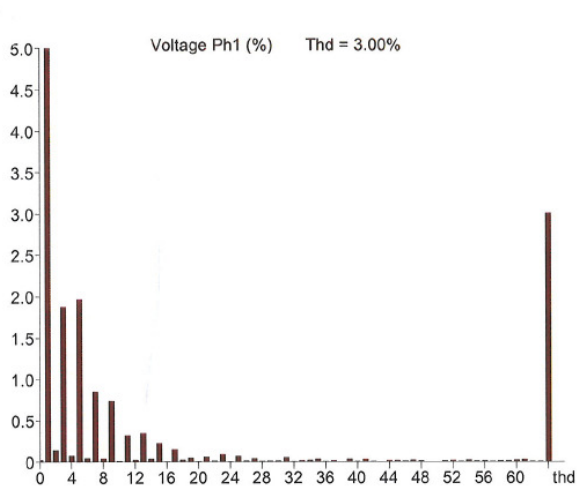
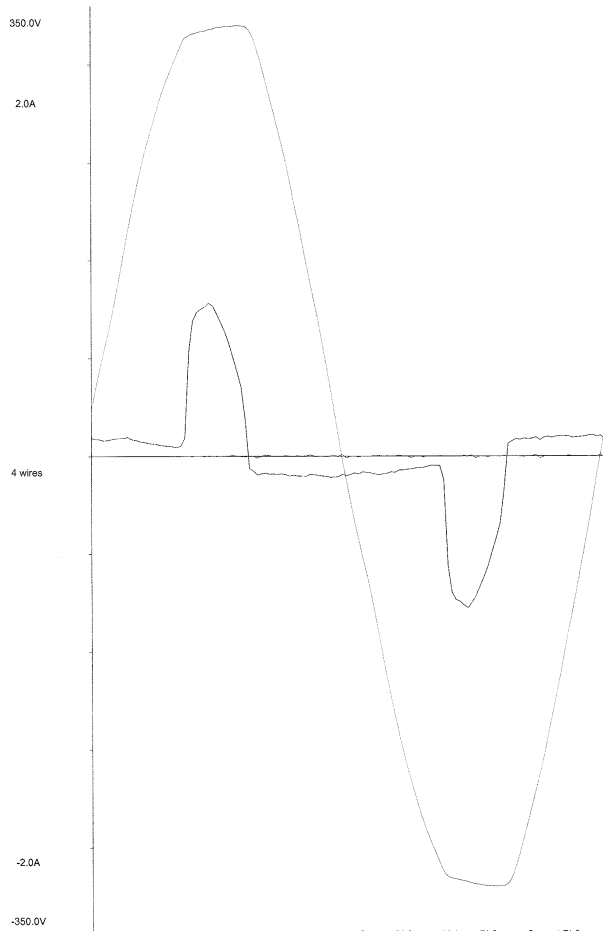
	Effekt W	THDU %	THDI %
PC uden skærm	61	3,16	87
Dataskærm	34	3,00	113
Oplader	51	3,25	123
Lysstofrør	38	3,08	17,77
LED lyskilde	12	3,32	17,03
Sparepære	10	3,05	129
Glødepære	62	3,06	2,93





Stationær PC uden skærm. Ionovo MT-M 8705-7 JG

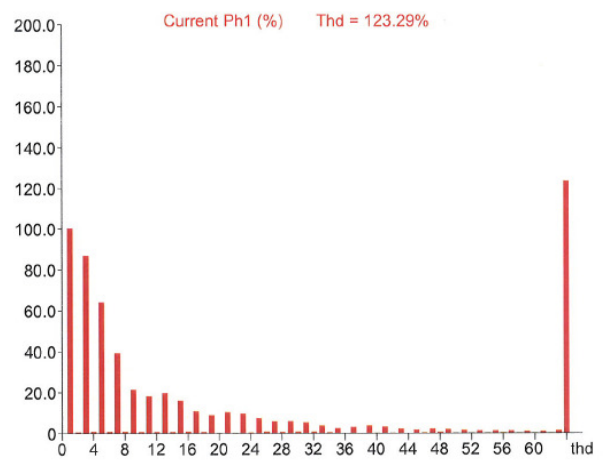
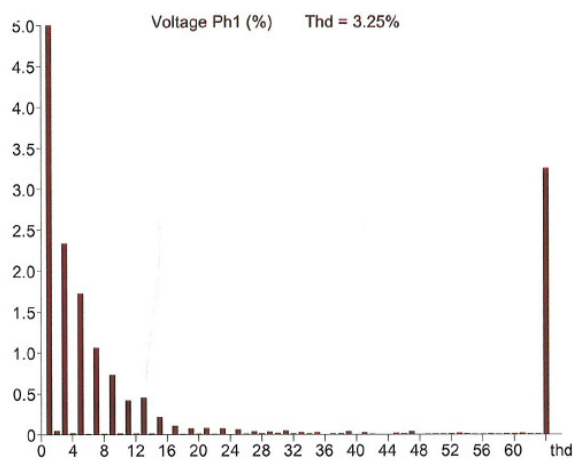
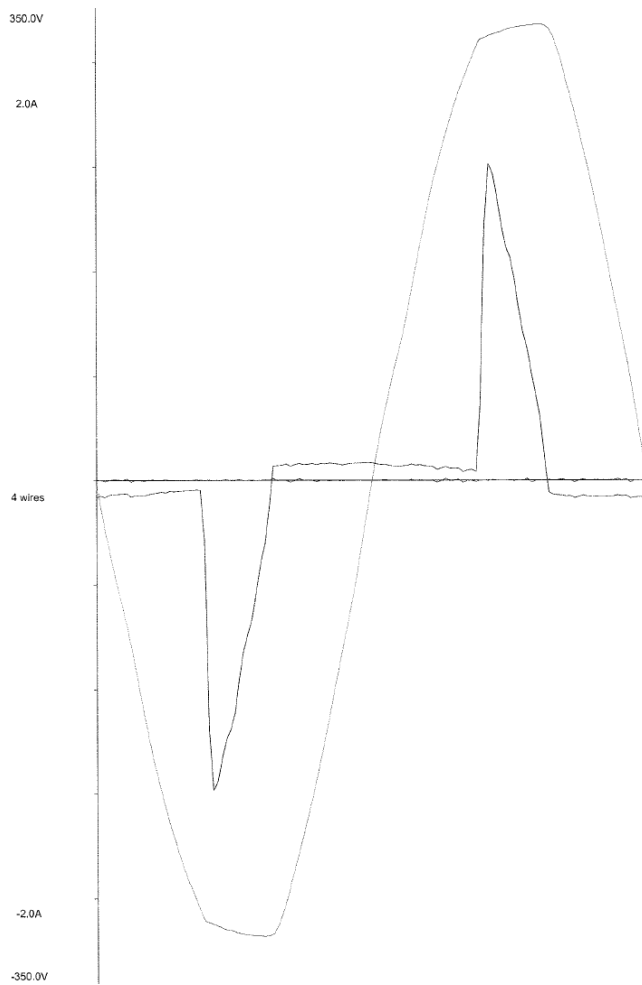
Øverst ses spændingskurve (omtrent sinusformet) og strømkurve.  
 Nederst vises de harmoniske af spænding (grundtonen er 100%) og strøm



## Dataskærm Philips 190 S

Øverst ses spændingskurve (omtrent sinusformet) og strømkurve.

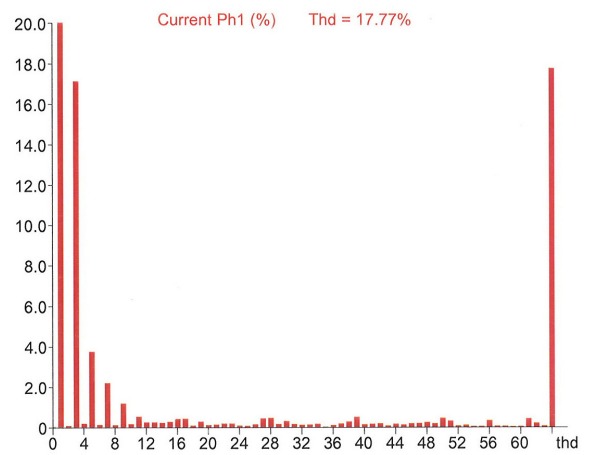
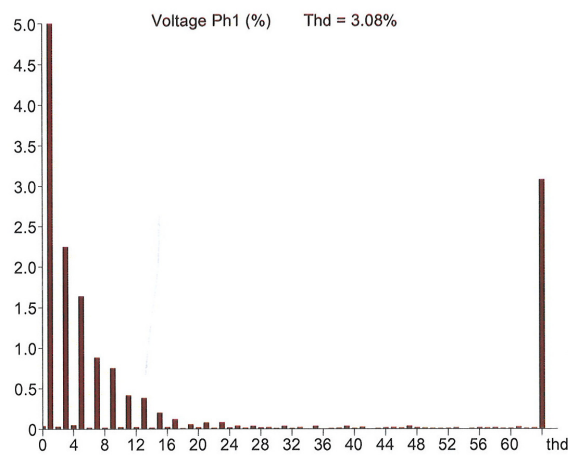
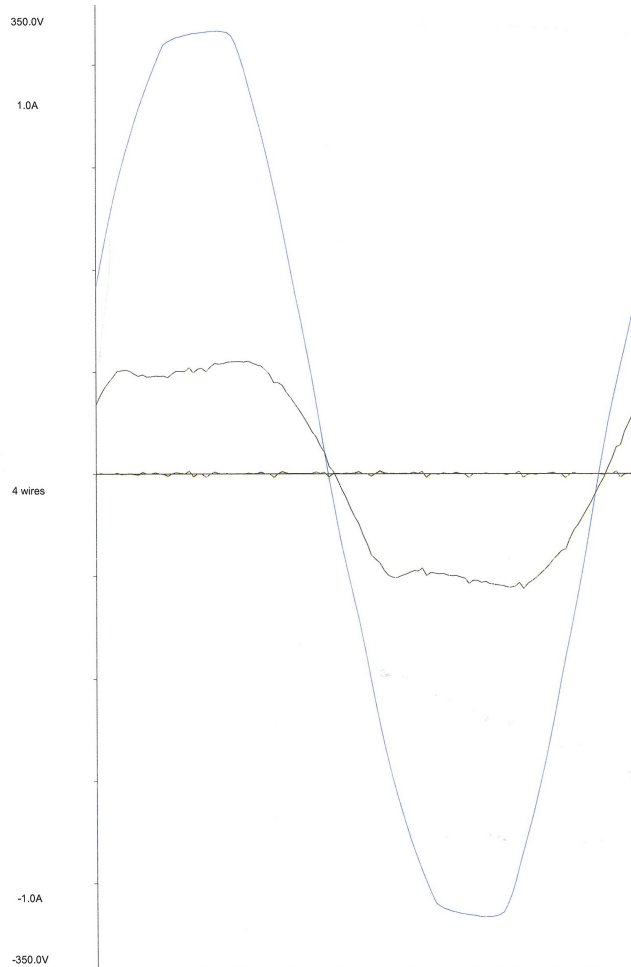
Nederst vises de harmoniske af spænding (grundtonen er 100%) og strøm



### Oplader. Toshiba Satelite S4090XCDT-4.3

Øverst ses spændingskurve (omtrent sinusformet) og strømkurve.

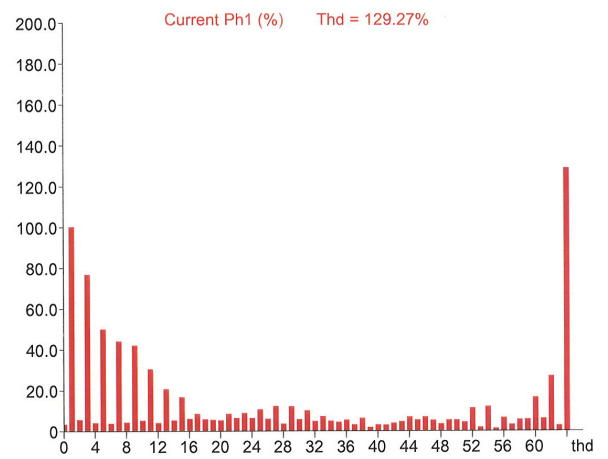
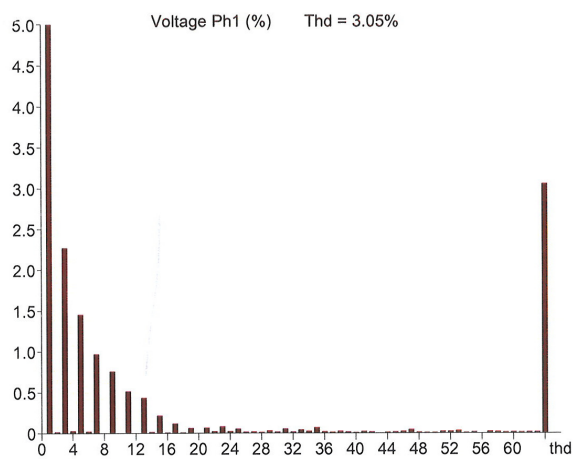
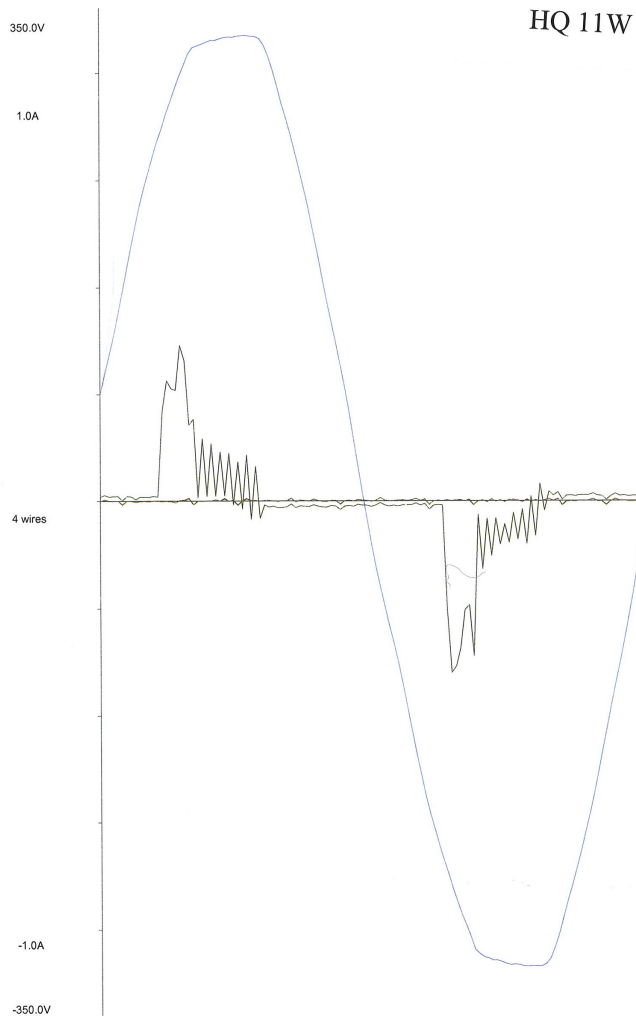
Nederst vises de harmoniske af spænding (grundtonen er 100%) og strøm



## Lysstofrør Philips TLD 36 W/82

Øverst ses spændingskurve (omtrent sinusformet) og strømkurve.

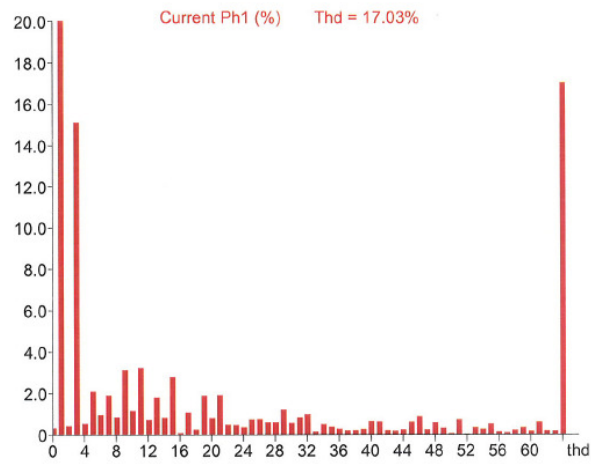
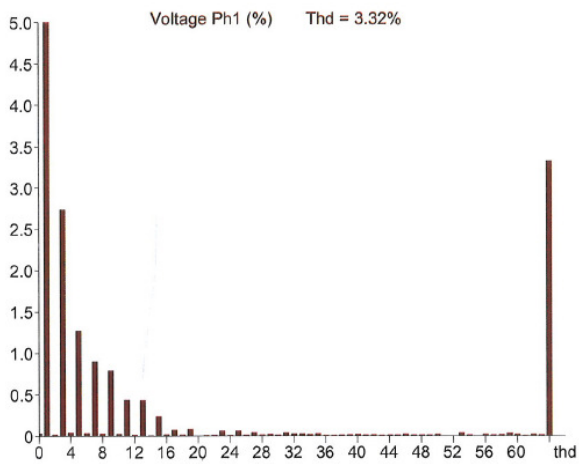
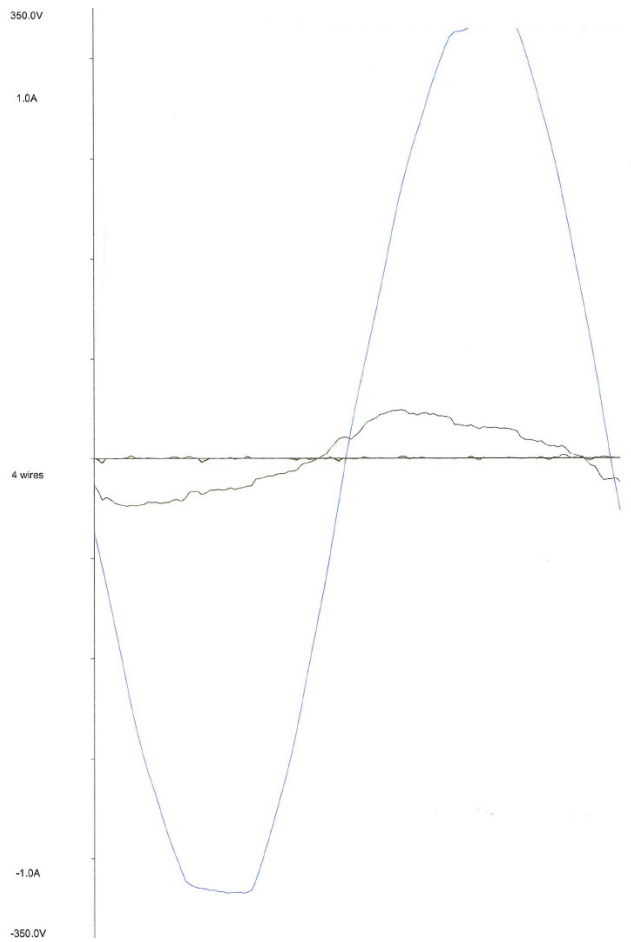
Nederst vises de harmoniske af spænding (grundtonen er 100%) og strøm



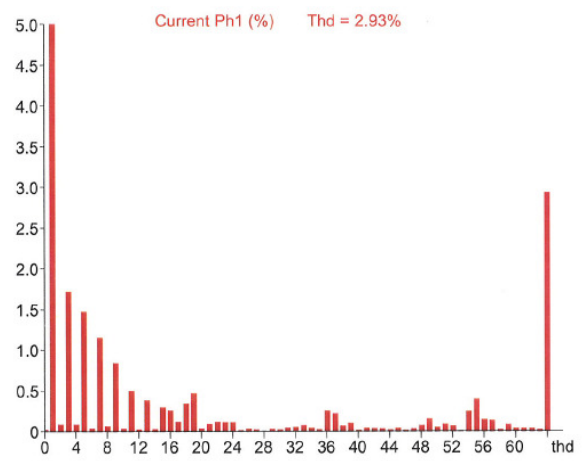
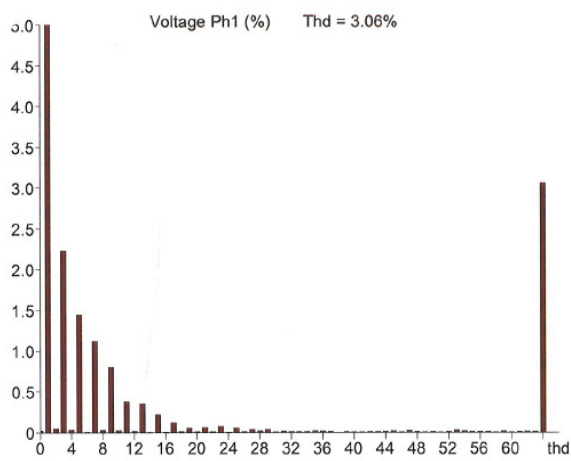
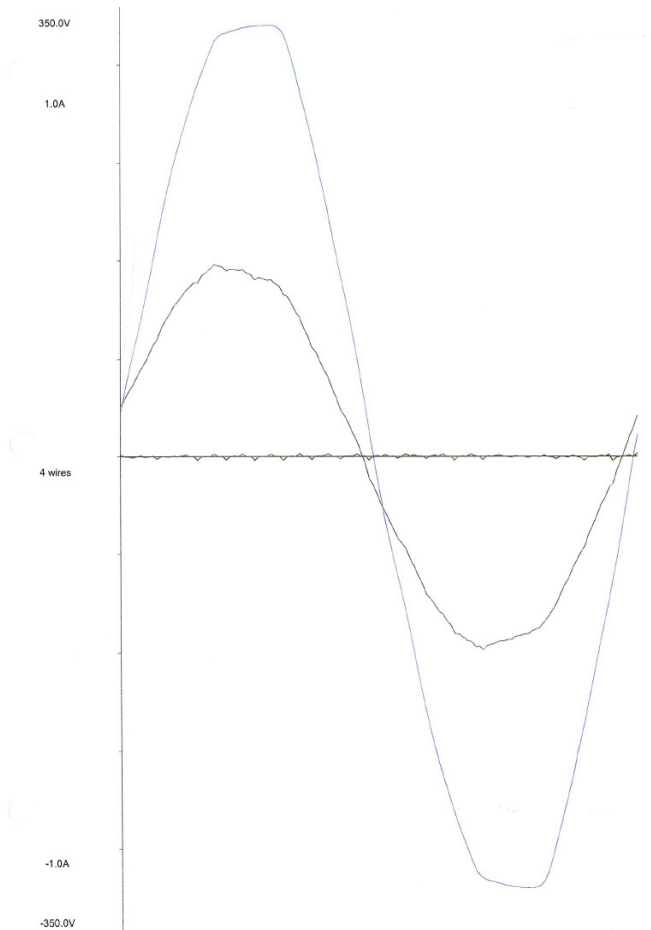
### Sparepære E19HQ, 11 W

Øverst ses spændingskurve (omtrent sinusformet) og strømkurve.

Nederst vises de harmoniske af spænding (grundtonen er 100%) og strøm



LED lyskilde. Thorn 12 W LED/0,06 A. Model LR6 – 230 V, 2700 K  
 Øverst ses spændingskurve (omtrent sinusformet) og strømkurve.  
 Nederst vises de harmoniske af spænding (grundtonen er 100%) og strøm



### Glødepære. Osram 60 W

Øverst ses spændingskurve (omtrent sinusformet) og strømkurve.

Nederst vises de harmoniske af spænding (grundtonen er 100%) og strøm

## **Bilag 2. Målinger af THD i 10 virksomheder**

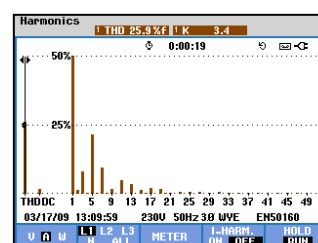
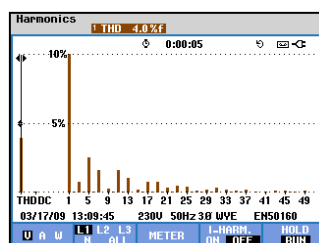
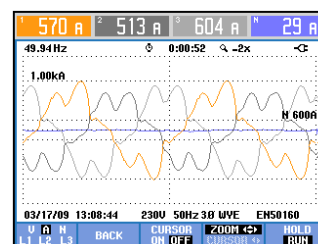
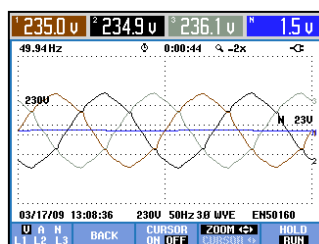
I bilaget vises resultater fra de 10 virksomheder, hvor der som led i forundersøgelsen er målt harmoniske strømme og spændinger. De gængs måledata er typiske middelværdier. For hver virksomhed vises resultater fra to tavler/transformere. Nedenunder vises fire figurer, hvor de to til venstre er spændingen, de to til højre strømmen. Øverst er selve kurveformen vist sammen med de tre faseværdier og nulstrøm/nulspænding. Nederst er vist de harmoniske (op til 50. harmoniske).



Kunde:	Ardagh Glass Holmegaard A/S
Adresse:	Glasværksvej 52
Postnummer:	4684 Holme-Olstrup
Kontaktperson:	Helge Lindegaard

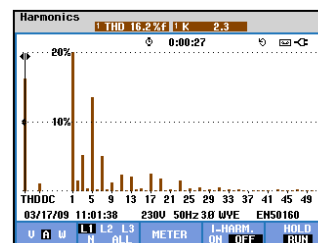
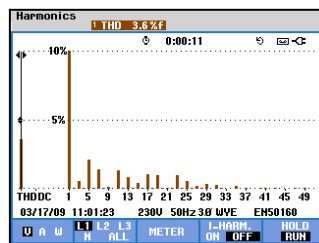
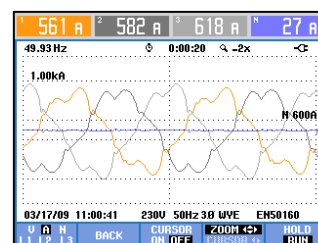
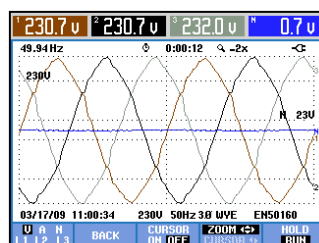
Måledata											
Applikation	målepunkt	dato	THDU	THDI	THDI 5.	I rms.	kVA	kW	kVAr	CosFI	PF
Glasproduktion	Tavle K	17.03.09	4,0%	27,0%	23,0%	600	420	380	170	0,94	0,90
Glasproduktion	Tavle Ø	17.03.09	3,6%	16,0%	13,0%	580	400	350	185	0,90	0,88

Generel data	
Tavle K:	
Transformer data:	1600 kVA 5,2% Ek
Last data:	
DOL-motor	50%
6-puls frekvensomf.	50%
Fasekompensering:	ingen
Kommentar: Der var på måletidspunktet lavere last end normalt da kun 3 af 7 produktionslinier kørte. Det må derfor forventes at de målte værdier øges markant ved fuld last.	



Screen's Tavle K

Generel data	
Tavle Ø:	
Transformer data:	1600 kVA 5,9% Ek
Last data:	
DOL-motor	50%
6-puls frekvensomf.	50%
Fasekompensering:	ingen
Kommentar: Der var på måletidspunktet lavere last end normalt da kun 3 af 7 produktionslinier kørte. Det må derfor forventes at de målte værdier øges markant ved fuld last.	

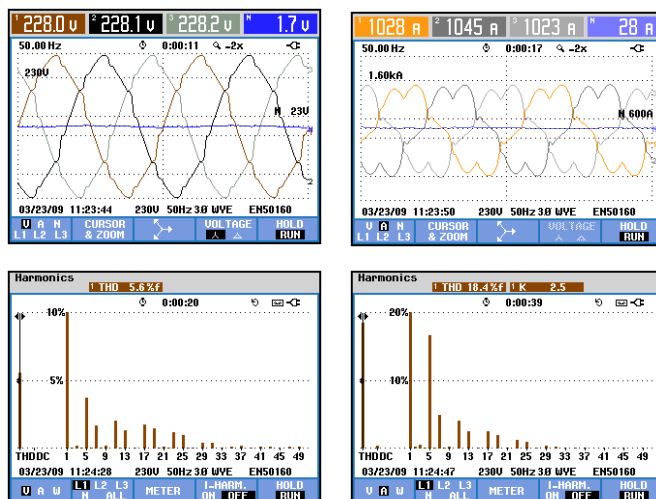


Screen's Tavle Ø

Kunde:	Akzo Nobel Salt A/S
Adresse:	Hadsundvej 17
Postnummer:	9550 Mariager
Kontaktperson:	Jens Aage Hansen

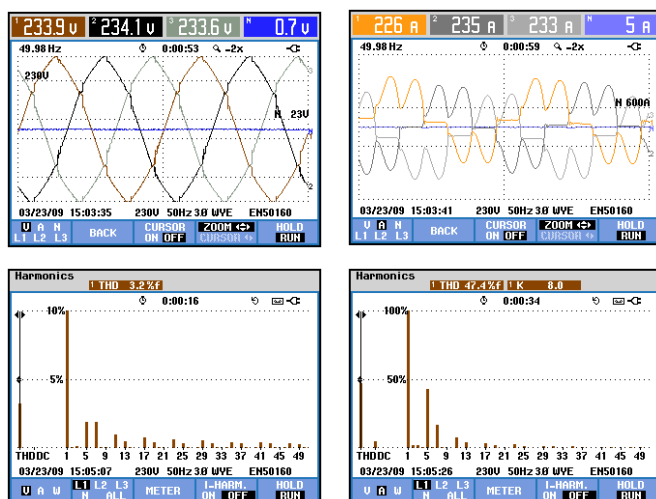
Måledata											
Applikation	målepunkt	dato	THDU	THDI	THDI 5.	lms.	kVA	kW	kVAr	CosFI	PF
Saltproduktion	Tavle 3M1	23.03.09	5,6%	19,0%	17,0%	1.050	720	660	270	0,94	0,93
Pumpeanlæg	Tavle 20M2	23.03.09	3,2%	47,0%	42,0%	225	160	145	73	0,99	0,89

Generel data	
Tavle 3M1:	
Transformer data:	1250 kVA
Last data:	
DOL-motor	25%
6-puls frekvensomf.	75%
Fasekompensering:	ingen
Kommentar: normal last	



Screen's Tavle 3M1

Generel data	
Tavle 20M2:	
Transformer data:	800 kVA
Last data:	
DOL-motor	0%
6-puls frekvensomf.	100%
Fasekompensering:	ingen
Kommentar:	

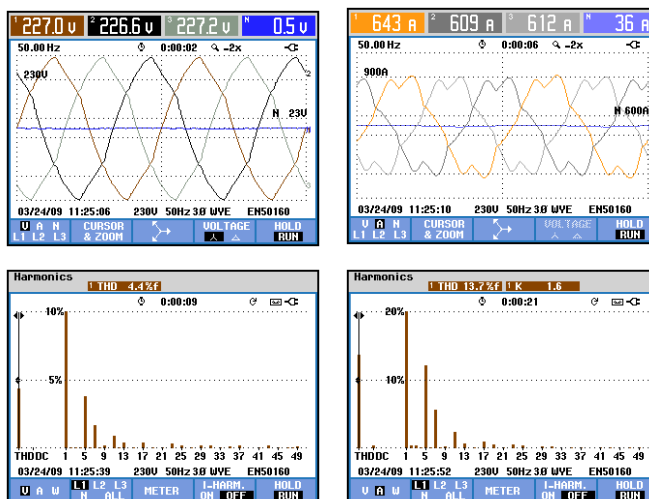


Screen's Tavle 20M2

Kunde:	Abena A/S
Adresse:	Egelund 35
Postnummer:	6200 Åbenrå
Kontaktperson:	Bo Groth Christensen

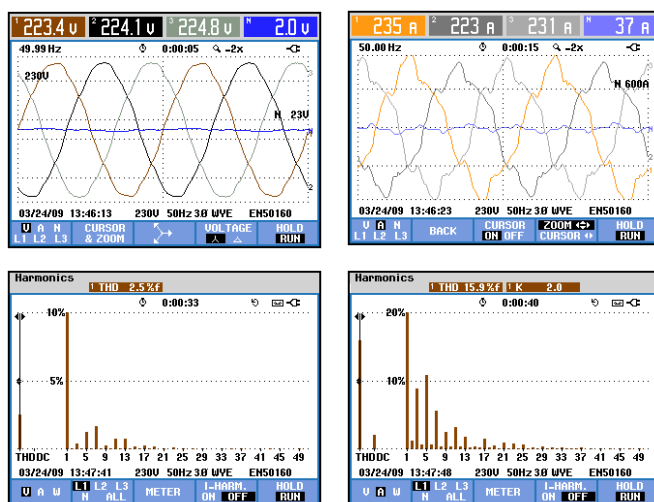
Måledata											
Applikation	målepunkt	dato	THDU	THDI	THDI 5.	lrms.	kVA	kW	kVAr	CosFI	PF
Ble maskine	Tavle M10	24.03.09	4,8%	13,0%	12,0%	620	410	380	155	0,93	0,92
Lager	Tavle H5.1	24.03.09	3,3%	18,0%	15,0%	200	120	90	70	0,79	0,76

Generel data	
Tavle M10:	
Transformer data:	800 kVA
Last data:	
DOL-motor	40%
6-puls frekvensomf.	60%
Fasekompensering:	ingen
Kommentar: Maskinen er bestykket med en større mængde servo-drev. Kunden har ca. 6 af disse maskiner.	



Screen's Tavle M10

Generel data	
Tavle H5.1:	
Transformer data:	800 kVA
Last data:	
DOL-motor	25%
6-puls frekvensomf.	75%
Fasekompensering:	ingen
Kommentar:	

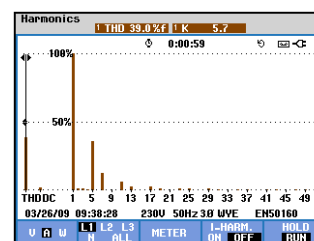
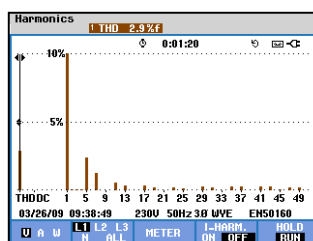
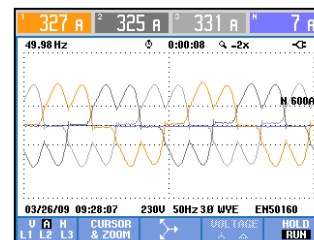
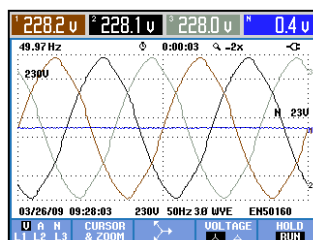


Screen's Tavle H5.1

Kunde:	Lynettefællesskabet I/S
Adresse:	Refshalevej 250
Postnummer:	1432 Kbh K.
Kontaktperson:	Theis Walløe

Måledata											
Applikation	målepunkt	dato	THDU	THDI	THDI 5.	lrms.	kVA	kW	kVAr	CosFI	PF
Regnvands pumper	Trafo 2	24.03.09	2,9%	39,0%	35,0%	330	205	224	90	0,97	0,92

Generel data	
Trafo 2:	
Transformer data:	1000 kVA
	4,7% Ek
Last data:	
DOL-motor	0%
6-puls frekvensomf.	100%
Fasekompensering:	ingen
Kommentar: Last graden på spildvands anlæget afhænger meget af mængden af regnvand. På måle tidspunktet havde det ikke regnet længe. Der var derfor meget lav last generelt på spildevands anlæget.	

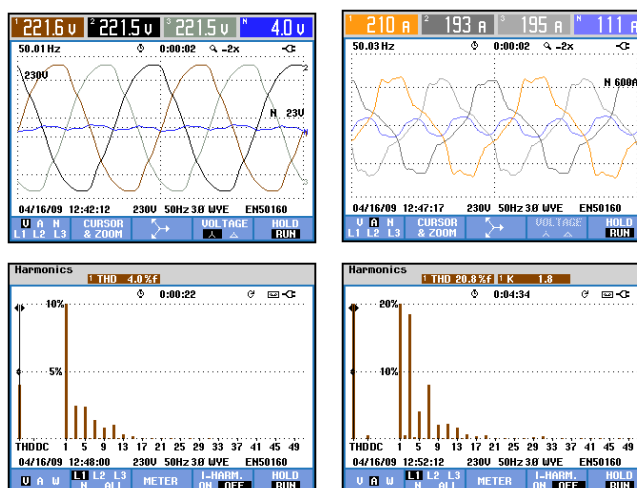


Screen's Trafo 2

Kunde:	LEGO Systems A/S
Adresse:	Åstedvej 1
Postnummer:	7190 Billund
Kontaktperson:	Mikkel Hovendahl

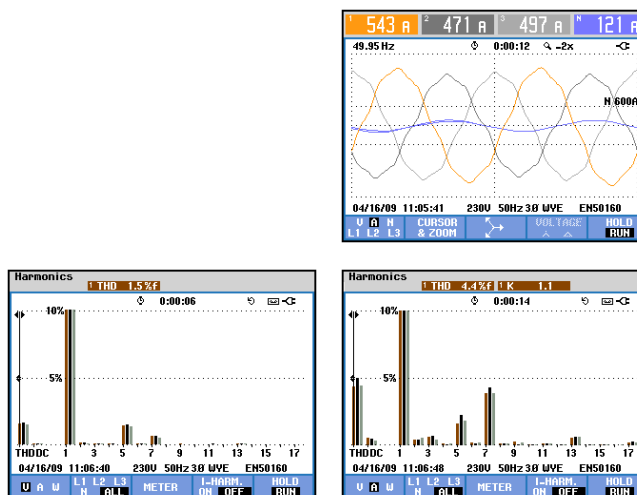
Måledata											
Applikation	målepunkt	dato	THDU	THDI	THDI 5.	Irms.	kVA	kW	kVAr	CosFI	PF
Pakke hal	Tavle 23-04	16.04.09	4,0%	23,0%	5,0%	190	130	120	50	0,94	0,91
Plast støbe maskiner	Tavle 99-08	16.04.09	1,8%	6,0%	3,0%	500	350	315	150	0,90	0,90

Generel data	
Tavle 23-04:	
Transformer data:	??? kVA
Last data:	
DOL-motor	?
6-puls frekvensomf.	?
Fasekompensering:	ingen
Kommentar: Last forholdet var på måletidspunktet under normalt.	



Screen's Tavle 23-04

Generel data	
Tavle 99-08:	
Transformer data:	630 kVA
Last data:	
DOL-motor	?
6-puls frekvensomf.	?
Fasekompensering:	Ca. 200 kVAr
Kommentar: De eksisterende plaststøbe maskiner anvender ikke frekvensomformere.	

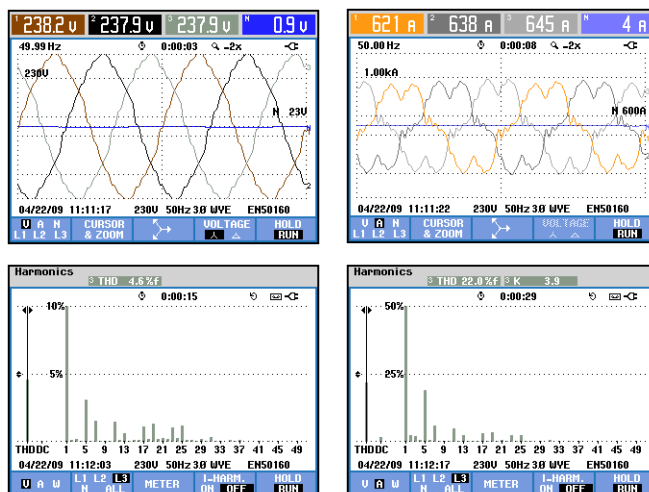


Screen's Tavle 99-08

Kunde:	Kommunekemi A/S
Adresse:	Lindholmvej 3
Postnummer:	5800 Nyborg
Kontaktperson:	Svend Erik Nielsen

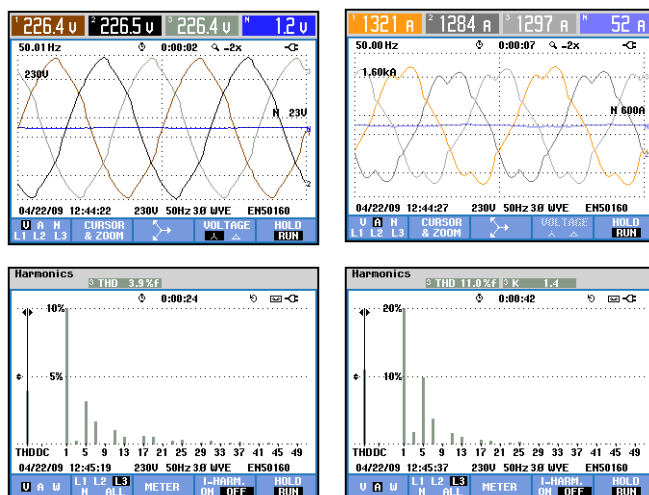
Måledata											
Applikation	målepunkt	dato	THDU	THDI	THDI 5.	Irms.	kVA	kW	kVAr	CosFI	PF
	Trafo F3	22.04.09	4,7%	22,0%	19,0%	650	450	420	160	0,96	0,93
	Trafo F2	22.04.09	3,9%	11,0%	10,0%	1.290	875	760	425	0,88	0,88

Generel data	
Trafo F3:	
Transformer data:	? 1600 kVA
Last data:	
DOL-motor	40%
6-puls frekvensomf.	60%
Fasekompensering:	40 kVAr
Kommentar:	



Screen's Trafo F3

Generel data	
Trafo F2:	
Transformer data:	? 1600 kVA
Last data:	
DOL-motor	80%
6-puls frekvensomf.	20%
Fasekompensering:	ingen
Kommentar:	

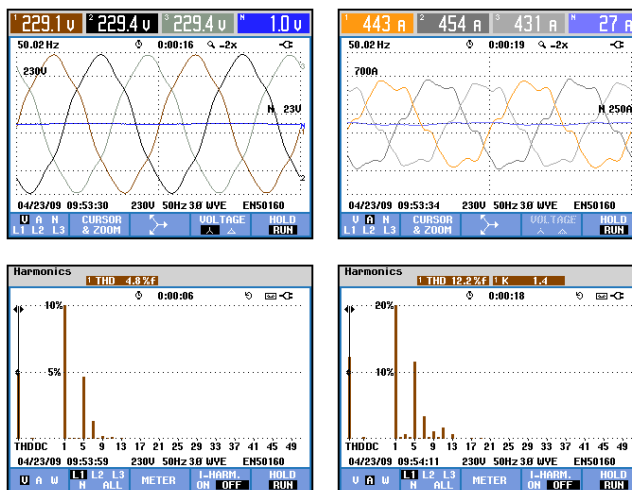


Screen's Trafo F2

Kunde:	Cheminova A/S
Adresse:	Thyborønvej 78
Postnummer:	7673 Harboøre
Kontaktperson:	Steen Møller

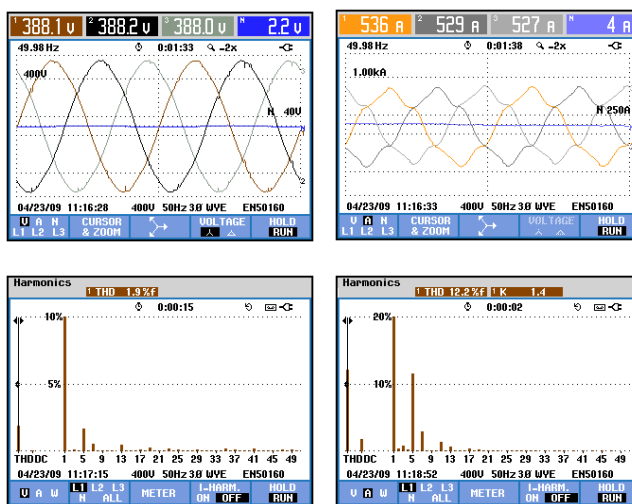
Måledata											
Applikation	målepunkt	dato	THDU	THDI	THDI 5.	Irms.	kVA	kW	kVAr	CosFI	PF
DMT anlæg	Trafo 7	23.04.09	4,8%	12,0%	11,0%	440	300	290	65	0,98	0,97
PMG "690V"	Trafo 19	23.04.09	1,6%	13,0%	12,0%	500	600	570	160	0,96	0,95

Generel data	
Trafo 7:	
Transformer data:	630 kVA
Last data:	
DOL-motor	
6-puls frekvensomf.	
Fasekompensering:	300 kVAr
Kommentar:	



Screen's Trafo 7

Generel data	
Trafo 19:	
Transformer data:	1000 kVA
Last data:	
DOL-motor	80%
6-puls frekvensomf.	20%
Fasekompensering:	400kVAr 5,67%
Kommentar:	

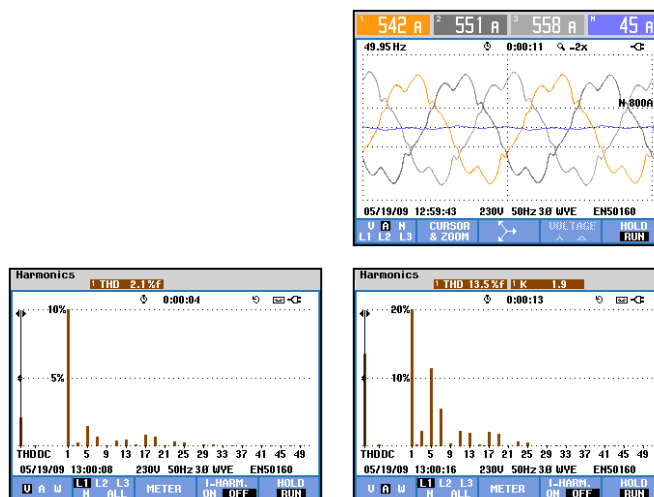


Screen's Trafo 19

Kunde:	Novozymes A/S
Adresse:	Nordre Fasanvej 215
Postnummer:	2000 Frederiksberg
Kontaktperson:	Steen Westring

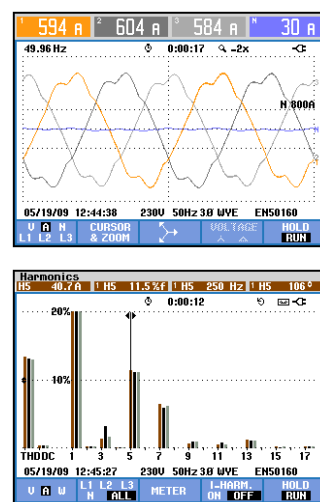
Måledata											
Applikation	målepunkt	dato	THDU	THDI	THDI 5.	Irms.	kVA	kW	kVAr	CosFI	PF
	Trafo D	19.05.09	2,1%	13,0%	11,0%	550	380	320	190	0,90	0,88
	Trafo E	19.05.09	0,7%	10,0%	8,0%	500	360	320	190	0,88	0,87

Generel data	
Trafo D:	
Transformer data:	1000 kVA
Last data:	
DOL-motor	80%
6-puls frekvensomf.	20%
Fasekompensering:	ingen
Kommentar:	



Screen's Trafo D

Generel data	
Trafo E:	
Transformer data:	2x1000 kVA
Last data:	
DOL-motor	90%
6-puls frekvensomf.	10%
Fasekompensering:	ingen
Kommentar:	



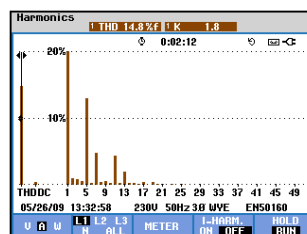
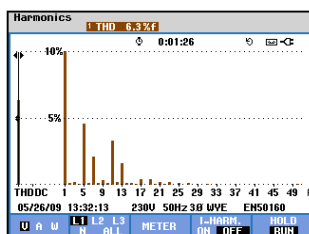
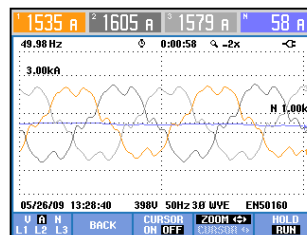
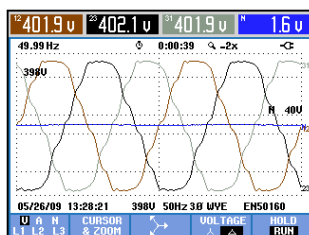
Screen's Trafo E



Kunde:	Færch Plast A/S
Adresse:	Rasmus Færchs Vej 1
Postnummer:	7500 Holstebro
Kontaktperson:	Henrik Thornager Andersen

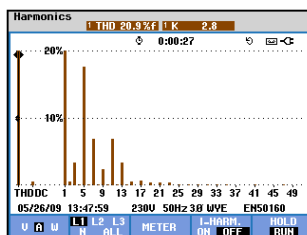
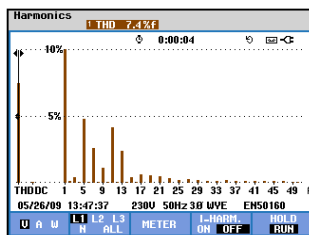
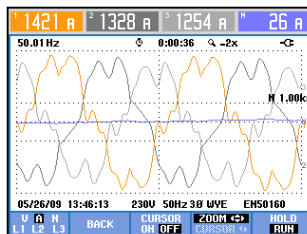
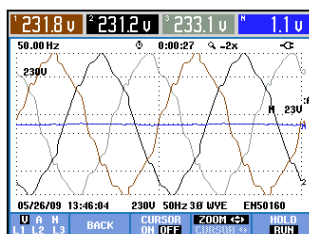
Måledata											
Applikation	målepunkt	dato	THDU	THDI	THDI 5.	Irms.	kVA	kW	kVAr	CosFI	PF
Extruder	Tavle HT2-K	26.05.09	6,5%	16,0%	14,0%	1.600	1.150	1.050	300	0,97	0,95
Extruder	Tavle HT3-K	26.05.09	7,3%	20,0%	17,0%	1.500	1.000	900	350	0,96	0,93

Generel data	
Tavle HT2-K	
Transformer data:	1400 kVA
Last data:	
DOL-motor	30%
6-puls frekvensomf.	70%
Fasekompensering:	200 kVAr
Kommentar:	



Screen's Tavle HT2-K

Generel data	
Tavle HT3-K	
Transformer data:	1400 kVA
Last data:	
DOL-motor	30%
6-puls frekvensomf.	70%
Fasekompensering:	200 kVAr
Kommentar:	

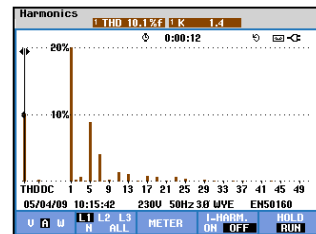
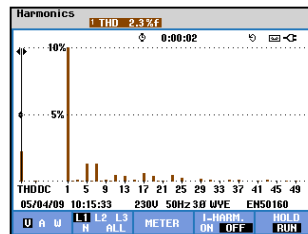
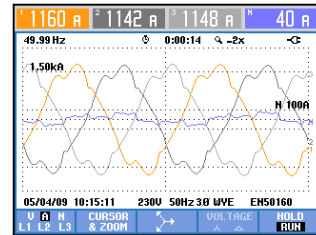
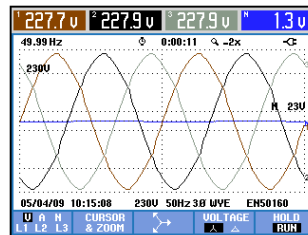


Screen's Tavle HT3-K

Kunde:	Haldor Topsøe A/S
Adresse:	Linderupvej 2
Postnummer:	3600 Frederikssund
Kontaktperson:	Michael Andersen

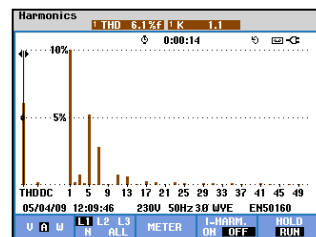
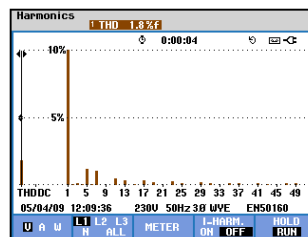
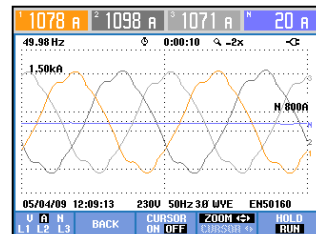
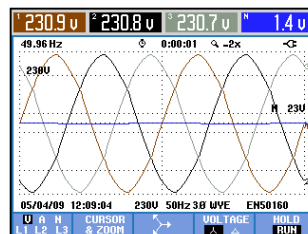
Måledata											
Applikation	målepunkt	dato	THDU	THDI	THDI 5.	I <sub>rms</sub>	kVA	kW	kVAr	CosFI	PF
	Tavle H25	04.05.09	2,3%	10,0%	8,5%	1.150	780	660	410	0,86	0,85
	Tavle H26	04.05.09	2,0%	5,8%	5,0%	1.120	770	630	450	0,82	0,82

Generel data	
Tavle H25	
Transformer data:	1600 kVA
	5,5% Ek
Last data:	
DOL-motor	75%
6-puls frekvensomf.	25%
Fasekompensering:	ingen
Kommentar:	



Screen's Tavle H25

Generel data	
Tavle H26	
Transformer data:	1200 kVA
Last data:	
DOL-motor	90%
6-puls frekvensomf.	10%
Fasekompensering:	ingen
Kommentar:	



Screen's Tavle H26