

# Harmoniske overtoners betydning for tabene i elmotorer



Marts 2012  
Dansk Energi Analyse A/S

# **Harmoniske overtoners betydning for tabene i elmotorer**

Elforsk projekt nr.: 342 – 030

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

**Marts 2012**

**Dansk Energi Analyse A/S  
Produktionsvej 2  
2600 Glostrup  
CVR-nr. 16259942**

## Indhold

Sammenfatning .....	2
Summary .....	2
1. Indledning .....	4
2. Aktive filtre til reduktion af harmonisk forvrængning .....	5
2.1 Aktiv filtrering af harmoniske .....	5
2.2 Transientfri reaktiv effektkompensering .....	6
2.3 Udligning af ubalancerede belastninger .....	6
3. Projektforløb .....	8
3.1 Videnopbygning .....	8
3.2 Måleprogram .....	8
4. Målinger hos Færch Plast .....	10
4.1 Installationen .....	10
4.2 Driftsregistreringer .....	10
4.3 Målinger september 2010 .....	11
4.4 Opnåede erfaringer .....	12
5. Målinger i laboratoriet .....	14
5.1 KME, Københavns Maskinmester- og Elinstallatørskole .....	14
5.2 Målinger hos Teknologisk Institut oktober 2011 .....	16
5.2.1 Forsøgsopstilling .....	16
5.2.2 Målinger .....	17
5.2.3 Konklusion .....	19
5.3 Målinger hos Teknologisk Institut januar 2012 .....	19
5.3.1 Forsøgsopstilling .....	19
5.3.2 Målinger .....	20
5.3.3 Konklusion .....	22
6. Analyse af tabene fra harmoniske i asynkronmotorer .....	23
6.1 Analyse ud fra ækvivalentdiagrammet .....	23
6.2 Analyse med eksperimentelt udledt formel .....	24
7. Beregning af tabene fra 5. harmoniske i 5,5 kW asynkronmotor .....	26
8. Referencer .....	28
Bilag 1. Målerapport fra Færch Plast .....	29

## Sammenfatning

Elforsk gav i 2010 støtte til projektet "Energibesparelser i erhvervslivet ved reduktion af harmoniske overtoner". Projektets formål har været gennem målinger at dokumentere elbesparelser i elinstallationer, hvor de harmoniske blev reduceret med aktive filtre. En forundersøgelse i 2009 havde vist, at harmoniske strømme medfører ekstra, uønskede strømvarmetab i direkte forsynede motorer og i ledninger og transformere. Projektet har fokuseret på tabene i direkte forsynede motorer, idet de andre strømvarmetab er velkendte og er små, set på landsplan.

Projektet har omfattet videnopbygning ud fra litteraturen og drøftelser med en svensk samt en belgisk producent af aktive filtre. Projektet har desuden gennemført forsøg på en ekstruderlinie hos Færch Plast, hvor forvrængningen fra harmoniske, målt som THDU, var 6-7%. Målinger over knapt to døgn, hvor det aktive filter blev koblet ind og ud med 10 minutters mellemrum, viste meget lille forskel på den optagne effekt i de to situationer. Effekten var 2,7 kW større med filteret tilsluttet end uden. Da filterets egetforbrug var 5,8 kW, var elforbruget i selve installationen 3,1 kW lavere. Det kunne tolkes som en elbesparelse på 1% af belastningen på de direkte forsynede asynkronmotorer.

Som følge af de meget små forskelle, der var målt hos Færch Plast, besluttedes det at henlægge det videre arbejde til et laboratorium for at måle under så kontrollerede forhold som muligt. Der er målt hos KME, Københavns Maskinmester- og Elinstallatørskole, og hos TI, Teknologisk Institut. Resultatet af målinger på en 5,5 kW asynkronmotor ved en harmonisk forvrængning THDU på 2,65% viser ingen signifikant ændring i den optagne effekt i forhold til situationen ved næsten ingen forvrængning. Der er heller ikke set nogen signifikant forskel i motortabene i et tilfælde, hvor der blev målt med to ret forvrængede netspændinger med THDU på hhv. 6,33% og 7,66%.

Beregninger ud fra motorens ækvivalentdiagram viser, at de ekstra motortab i en 5,5 kW motor som følge af en 5. harmonisk på 5% af netspændingen (THDU 5%) kun er af størrelsesordenen 2 W, mens en eksperimentelt udledt formel giver en forskel på ca. 9 W eller 0,2% af motorens mærkeeffekt. Resultaterne af laboratoriemålingerne svarer meget godt til disse beregnede tab.

På dette grundlag konkluderes, at harmoniske strømme og spændinger medfører energitab i direkte forsynede asynkronmotorer, men at energitabet er meget beskedent ved de niveauer af forvrængning – en THDU på op til 6-8% - som forekommer i dansk industri. Motorer, der forsynes via frekvensomformer, påvirkes ikke af harmoniske i forsyningsnettet.

Analysen af motortabene viser, at tabene fra det modmoment, som den 5., 11., 17. osv. harmoniske skaber, er væsentligt mindre end de (meget små) strømvarmetab i motoren, som de samme harmoniske er årsag til. Analysen viser også, at strømforvrængningen i motorerne reducerer strømmene og tabene fra de højere harmoniske. Ud fra en tabsmæssig betragtning er de lavere harmoniske og specielt 5. samt 7. harmoniske derfor vigtigst.

## Summary

The project "Energy saving in business and industry by reduction of harmonics" was granted by Elforsk in 2010. The purpose of the project was to provide evidence of power saving based on measurements in electric installations, in which the harmonics were reduced by active filters. A preliminary investigation in 2009 had indicated that harmonics cause additional unwanted current heat losses in directly supplied motors and in wires and transformers. The

project granted in 2010 focused on losses in directly supplied motors, as the other current heat losses are well known and low on a national basis.

The project has included knowledge building on the basis of literature and discussions with a Swedish and a Belgian producer of active filters. In connection with the project, tests have been made on a production line at the firm of Færch Plast, where the distortion from the harmonics, measured as THDU, was 6 to 7 %. Measurements during two days with the active filter switched on and off with an interval of 10 minutes showed a very small difference in power input in the two situations. The power was 2.7 kW higher with connected filter than without filter. As the own consumption of the filter was 5.8 kW, the consumption of the installation itself was 3.1 kW lower, equal to 1 % of the load of the directly supplied induction motors.

As a consequence of the very small differences, measured at Færch Plast, it was decided to transfer the further work to a laboratory in order to measure under so controlled circumstances as possible. Measurements have been taken at KME (Copenhagen School of Marine Engineering and Technology Management) and at TI (Danish Technological Institute). The result of measurements on a 5.5 kW induction motor with a distortion from the harmonics (THDU) of 2.65 % shows no significant change in the input power compared to the situation with almost no distortion. Neither, it appears, is there a significant difference in the motor losses in a situation, where the measurement was taken with two rather distorted mains voltages with a THDU of 6.33 % and 7.66 %, respectively.

Calculations on the basis of the equivalent diagram of the motor show that the additional motor losses in a 5.5 kW motor as a consequence of 5. harmonics of 5 % of the mains voltage (THDU 5 %) only is 2 W, while an experimentally derived formula results in a difference of approx 9 W or 0.2 % of the rated power of the motor. The results of the lab measurements correspond very well to the losses calculated.

On this basis it is concluded that harmonic currents and voltages cause energy losses in induction motors directly supplied, but that the energy losses are fairly low at the levels of distortion, a THDU of up to 6 to 8 %, which occur in Danish industry. Motors, which are supplied through a frequency converter, are not influenced by the harmonics in the supply mains.

The analysis of the motor losses shows that the losses from the load torque, caused by the 5., 11., 17. etc harmonics, are considerably lower than the (very small) current heat losses in the motor, which have been caused by the same harmonics. The analysis also shows that the current displacement in the motors reduces the currents and the losses from the higher harmonics. Considering losses consequently the lower harmonics and especially 5. and 7. harmonics are most important.

## 1. Indledning

Elforsk bevilgede i 2010 støtte til projektet "Energibesparelser i erhvervslivet ved reduktion af harmoniske overtoner", hvis formål har været gennem målinger at dokumentere elbesparelser i elinstallationer med aktive filtre til reduktion af de harmoniske. Bevillingen blev givet til en projektgruppe bestående af ABB, Balslev og Dansk Energi Analyse på baggrund af en forundersøgelse, som projektgruppen har udført i 2009 (ref. 1).

Forundersøgelsen omfattede målinger i ti danske virksomheder af omfanget af harmoniske spændinger, udtrykt ved THDU. Undersøgelsen omfattede endvidere en analyse af den harmoniske forvrængnings indflydelse på energieffektiviteten, hvor de overharmoniske strømme medfører ekstra, uønskede strømvarmetab i direkte forsynede motorer og i ledninger og transformere. Af disse tab vurderedes det ud fra en national energibetragtning, at tabene i direkte forsynede asynkron-motorer kunne være væsentlige. Tabene i asynkronmotorer som følge af overharmoniske strømme forekommer som strømvarmetab i stator og rotor og yderligere som et reduceret og/eller pulserende drejningsmoment, forårsaget af 5., 11., 17. osv. harmoniske.

Forundersøgelsen konkluderede, at det kunne være økonomisk rentabelt at reducere de harmoniske ved hjælp af aktive filtre i de 10 – 20% af erhvervslivets installationer, hvor THDU er mindst 5 – 6%. Den mulige elbesparelse blev skønnet til i gennemsnit 4% eller 30 – 60 GWh/år, som primært forventedes opnået i direkte forsynede motorer.

Da skønnet over besparelsesmulighederne var baseret på erfaringer fra en enkelt belgisk og fire svenske industriinstallationer, og da de svenske erfaringer ikke var underbygget med målinger, søgte projektgruppen støtte til at gennemføre detaljerede målinger i nogle erhvervs-virksomheder for at opnå veldokumenterede data for elforbruget pr. produceret enhed med og uden aktive filtre. Elforsk bevilgede støtten i 2010 og projektet er udført i perioden februar 2010 – marts 2012.

Projektet har gennemført målinger hos bl. a. Færch Plast og Københavns Maskinmester- og Elinstallatørskole og takker disse for deres beredvillige medvirken i måleprogrammet.

## 2. Aktive filtre til reduktion af harmonisk forvrængning

Aktive filtre kan korrigere spændingskurvens form, hvad enten der er tale om harmoniske, langsomme transienter som f.eks. ved opstart af store motorer eller om direkte reduktion af forstyrrelser fra nettet. De virker principielt som et statisk UPS anlæg uden batteribank, idet et elektronisk kredsløb detekterer spændingskurvens deformation og opløser kurven i harmoniske komponenter, hvorefter differensen mellem den aktuelle kurveform og den ønskede sinusform tillægges via en udgangstransformer.

Aktive filtre har tre hovedfunktioner:

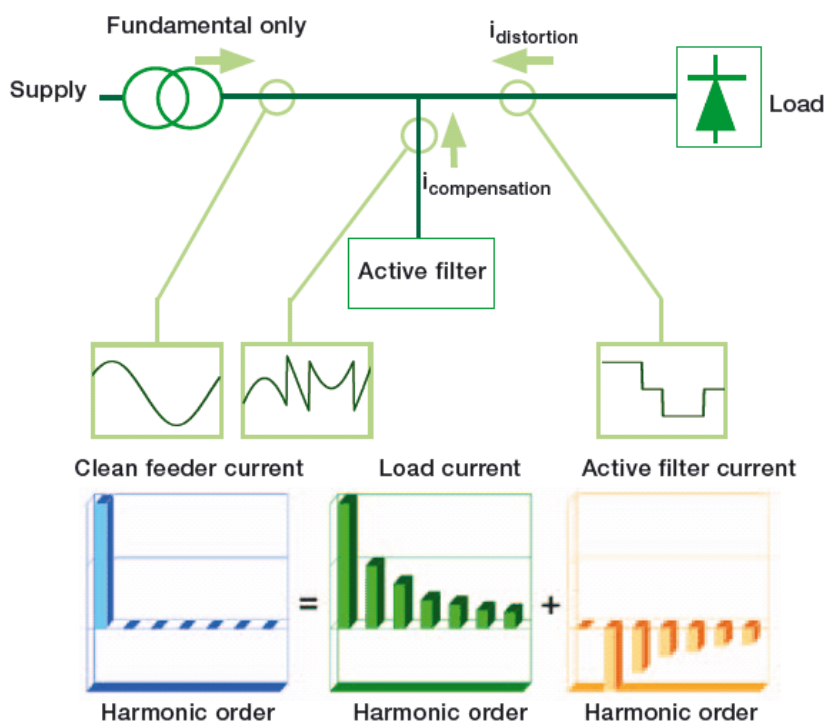
- Aktiv filtrering af harmoniske
- Transientfri reaktiv effektkompensering af induktive og kapacitive belastninger til en indstillelig målværdi
- Udligning af ubalancerede belastninger forbundet mellem faser og/eller forbundet mellem fase og nul

De vigtigste funktioner er beskrevet i det følgende med ABB's aktive PQF-filtre som eksempel.

### 2.1 Aktiv filtrering af harmoniske

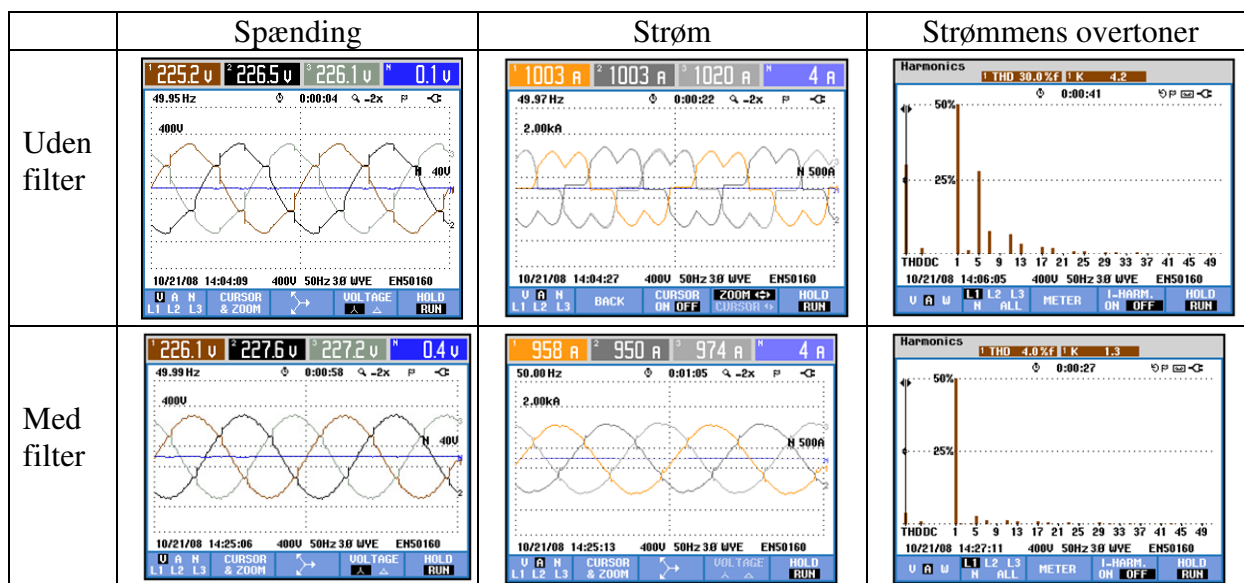
Filteret analyserer forsyningsstrømmen, der måles med strømtransformere, og sammenligner den harmoniske forurening, som er til stede, med den harmoniske forurening, som brugeren tillader iht. indlæste data. Filteret injicerer så pr. harmoniske en bølgeform, som har den samme harmoniske frekvens, men som er i modfase. Hvis udsvinget på den injicerede strøm matcher med udsvinget på den harmoniske belastning, så fjernes den harmoniske fuldkomment. Hvis der er indlæst andre krav (f. eks. grænseværdier fastlagt i bestemmelser), vil forsyningsstrømmen maksimalt have udsving, fastsat iht. grænsen.

Princippet med det aktive PQF-filter er vist på figur 1.



Figur 1. Princippet i aktive filtre

Figur 2 viser et eksempel på aktiv filtrering af harmoniske overtoner i strømme og spændinger. Med det aktive filter er THDU blevet reduceret fra 8,2% til 2,2%, og THDI er reduceret fra 30% til 4%.



Figur 2. Eksempel på spændingernes og strømmenes kurveform uden og med aktivt filter

## 2.2 Transientfri reaktiv effektkompensering

De aktive PQF-filtre muliggør også transientfri reaktiv effektkompensering af induktive og kapacitive belastninger. Denne funktion giver følgende fordele:

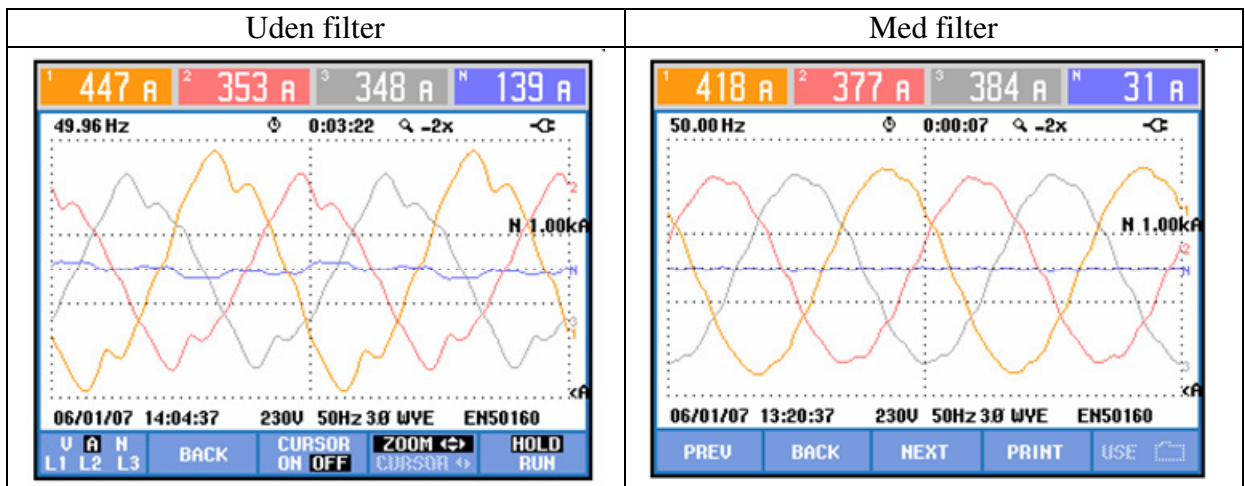
- Den opretholder integriteten af følsomme installationer (f. eks. hospitaler og belastninger med forsyning fra generatorer), som kræver transientfri og præcis reaktiv effektkompensering uden risiko for overkompensering.
- Eksempelvis opererer mange servere i datacentre ved moderat kapacitiv strømfaktor, hvorfor UPS-systemer skal være i derated mode. Takket være kompenseringen af den kapacitive effektfaktor kan UPS'er operere ved nominel effekt, så behovet for ekstra UPS-effekt og pladsforbrugende batterier undgås.
- Mindre behov for reaktiv effekt på netværket betyder, at systemtabene reduceres

## 2.3 Udligning af ubalancerede belastninger

Denne funktion er vigtig, da enfasede belastninger i 4-leder systemer (3 faser + nul), som anvendes i mange erhvervsapplikationer, typisk viser en belastningsubalance, som resulterer i ekstra nulstrøm (foruden harmonisk strøm, som også ofte er til stede).

Figur 3 viser et eksempel på fasestrømme og nulstrøm i et "mediehus" uden og med aktivt filter. Filteret reducerer nulstrømmen fra 139 A til 31 A og sikrer en mere jævn fordeling af strømmene i de tre faser. Samtidig er strømmens kurveform væsentligt mindre forvrænget i kraft af det aktive filter.





Figur 3. Eksempel på afbalancering af fasestrømme og reduktion af nulstrømmen med aktivt filter

De fordele, som er forbundet med udligningen af ubalancerede belastninger, er:

- For høj nulstrøm medfører for tidlig aldring af lederen. Ved at anvende afbalanceringsfunktionen til kompensering af nullen, sker der en positiv påvirkning af nullelederens levetid.
- Ved at afbalancere nullederen og udjævne strømbelastningen på tværs af de tre faser kan systemtabet foran filtertilslutningspunktet reduceres.
- Høj nulstrøm medfører spændingsopbygning over nullen, hvilket kan medføre en sikkerhedsrisiko og også driftsproblemer ved nogle kritiske belastningstyper (f. eks. serversystemer).

Selv om kompensation af ubalancer er særlig relevant i 4-ledersystemer, kan det også ske, at der opstår en belastningsubalance i trefasede industrielle applikationer. En belastningsubalance vil skabe spændingsubalance, som overføres til alt udstyr, der er forbundet til samme forsyningsystem. Det kan føre til tidlige svigt og mindre effektiv drift. Derfor er PQF-filtrene udstyret med en funktion til også at afbalancere belastninger forbundet mellem faser.

### 3. Projektforløb

Projektet blev påbegyndt umiddelbart efter tilsagnet om bevilling i februar 2010. Den første aktivitet var videnopbygning, som efterfulgtes af et måleprogram.

#### 3.1 Videnopbygning

Der er indsamlet viden fra litteraturen og indhentet erfaringer fra ABB's filterfabrik og fra den konkurrerende leverandør Comsys i Sverige.

Litteraturen om energitab som følge af harmoniske er meget begrænset, men der er dog enkelte artikler (ref. 2 – 5). Artiklerne har været til nytte ved tolkningen af måleresultaterne, se afsnit 6 og 7.

ABB's filterfabrik i Charleroi, Belgien, havde ikke selv erfaringer med elbesparelser ved filtrering af harmoniske, men henviste til det belgiske firma APS NV, der havde foranlediget målingerne på en belgisk plastfabrik i 2006, udført af Labo Lemcko (ref. 6). Ifølge rapporten fra plastfabrikken var der målt en reduktion i den aktive effekt fra ekstruderinstallationen på 15,5%, når det aktive filter var i drift. Rapporten understregede dog, at denne måling ikke siger noget om, hvad der generelt kan spares med aktive filtre. Vi efterlyste nærmere oplysninger og – da vi ikke selv fandt besparelser af bare tilnærmelsesvis samme omfang ved vore målinger – forespurgte, om vi selv kunne få lov at måle på den pågældende installation for i detaljer af undersøge, hvor besparelserne opnås. I februar 2011 modtog vi følgende besked fra Filip De Bruyne hos APS NV:

"Rapporten fra Labo Lemcko om Beaulieu virksomheden er flere år gammel. I dag er installationen ændret (nye frekvensomformere etc. på maskinerne), så situationen er en anden end da vi installerede de aktive filtre. Yderligere er de aktive filtre i testen gået i stykker (heldigvis er vi og ABB uden skyld deri). Der er ikke længere aktive filtre i den installation, og der er ikke behov for dem."

Projektet besøgte Comsys i Lund og senere også Tetra Pak i Lund, som har tre Comsys filtre i deres produktionsafsnit med kartonmaskiner. Tetra Pak har ud fra nøgletal for elforbruget i perioder med og uden de aktive filtre opgjort elbesparelsen til 5 – 10%. Der findes en rapport med resultater, men den er fortrolig, og vi kunne ikke få lov at se den. Vi bad Comsys om at skaffe os mulighed for at måle på en anden af deres filtre og mødte velvilje, uden at der dog kom en konkret aftale ud af det.

#### 3.2 Måleprogram

Projektets første målinger på en installation med aktive filtre blev udført i foråret 2010. Da de rapporterede belgiske resultater var fra en ekstruderlinie, blev filteret afprøvet på en sådan linie hos Færch Plast, som velvilligt stillede sig til rådighed. Målingerne hos Færch Plast er nærmere beskrevet i afsnit 4. Målingerne viste meget små og ret usikre besparelser med det aktive filter, hvorfor projektgruppen besluttede at udskyde de øvrige planlagte målinger i produktionsanlæg – der havde været arbejdet med Novozymes, Karup Kartoffelmelsfabrik og Nordforbrænding – for i stedet at måle under så kontrollerede forhold som muligt i et laboratorium. I laboratoriet kunne der også måles ved større harmoniske forstyrrelser, end der forekommer i industrien.

Der gennemførtes først to målekampanjer hos KME, Københavns Maskinmester- og Elinstallatørskole, hvor der som beskrevet i afsnit 5.1 blev målt små tab fra de harmoniske, tab på niveau med måleusikkerheden. Derfor målttes også hos TI, Teknologisk Institut, se afsnit 5.2 og 5.3. Resultatet af TI-målingerne blev vurderet ud fra litteraturen (ref. 2 – 5), og har

givet anledning til de konklusioner, som er beskrevet i afsnit 6, nemlig at tabene som følge af harmoniske spændinger er meget små, under 1% af motorens mærkeeffekt, ved de harmoniske forstyrrelser, der forekommer i dansk erhvervsliv.

## 4. Målinger hos Færch Plast

Målingerne hos Færch Plast blev udført i perioden april – september 2010. Der udførtes nogle orienterende målinger i april 2010, som fulgtes op med en måleserie i juni 2010. Måleserien viste besparelser på 1 til 5% af den optagne effekt, men de viste også, at besparelserne var meget svingende, hvorfor en ny måleserie blev gennemført d. 7.-9. september 2010.

I juni målt den optagne effekt med Balslevs Dosena Power Quality Analyzer, mens der i september også blev benyttet ABB's Fluke netanalysator med Rogowskispoler. Ved målingerne i september konstateredes hurtigt, at de to instrumenter ikke viste samme måleværdier, samt at Dosena instrumentet viste en betydelig skæv belastning. Ydermere konstateredes det, at afvigelsen på Dosena var afhængig af feltstyrken omkring faselederne og også var frekvensafhængig. Årsagen var, at Dosena analysatorens strømtransformere var placeret, så de også registrerede en del af magnetfeltet fra lavspændingsinstallationen. Målingerne i juni måtte derfor kasseres, og målingerne i september blev herefter baseret på Fluke instrumentet med Rogowskispoler, der ikke påvirkes af magnetfeltet.

### 4.1 Installationen

Det aktive filter var ved målingerne tilsluttet Færchs lavspændingsskinne HT2, der forsynes fra en 2500 kVA 10/0,4 kV transformer. Belastningen på skinnen har i september-måleperioden ligget mellem 1,0 og 1,3 MW. Belastningen består af:

- ekstruder H med en belastning på 400-450 kW i form af varmelegemer og asynkronmotor med frekvensomformer
- en del af ekstruder F med varmelegemer og asynkronmotor med frekvensomformer
- køleenhederne 9006, 9007 og 9009 med direkte forsynede asynkronmotorer. Belastningen svinger, men ligger typisk på 150 kW
- fem kværne, hvoraf i hvert fald 4932 og 4933 har direkte forsynede asynkronmotorer. Belastningen på de to kværne ligger på 10-30 kW
- anden belastning på omkring 200 kW. Der er stort set ingen direkte forsynede asynkronmotorer

Ca. 260 kW eller godt 20% af belastningen er direkte forsynede asynkronmotorer.

Det aktive filter er et ABB PQFM filter på 300 A, som blev installeret på prøve i slutningen af 2009. Filteret var indstillet til at fjerne 5., 7., 11. og 13. harmoniske. Filteret var tilsluttet på sekundærsiden af 10/0,4 kV transformeren.

Lavspændingsinstallationens THDU var under målingerne i september 6-7% uden filteret inde og 4-5% med filter.

### 4.2 Driftsregistreringer

Færch registrerer en lang række data vedrørende produktion og elforbrug med en stor tidsopløsning. For at vurdere det aktive filters indflydelse på effektiviteten er det specifikke elforbrug opgjort for de uger i 2009, hvor produktionen har været mest jævn (samlet produktion på ekstruderne H, F og C mellem 600 og 700 tons), se tabel 1.

Det specifikke elforbrug for alle tre ekstrudere under ét har praktisk taget været det samme i de to ugeperioder, mens det specifikke elforbrug for ekstruder H og F har været lavere i ugerne med filter end i ugerne uden. (Det specifikke elforbrug for H og F er opgjort ud fra de to ekstruderes produktion og belastningen på HT2, selv om en del af ekstruder F's belastning er på

HT3). Det kunne indikere, at det aktive filter har øget eleffektiviteten på HT2, men det er en usikker konklusion, da den gennemsnitlige ugeproduktion har ligget højere i ugerne med filter (extruder H plus F i alt 527 t/uge mod 474 t/uge i ugerne uden filter), og et eventuelt grundlastforbrug derfor er fordelt på flere timer.

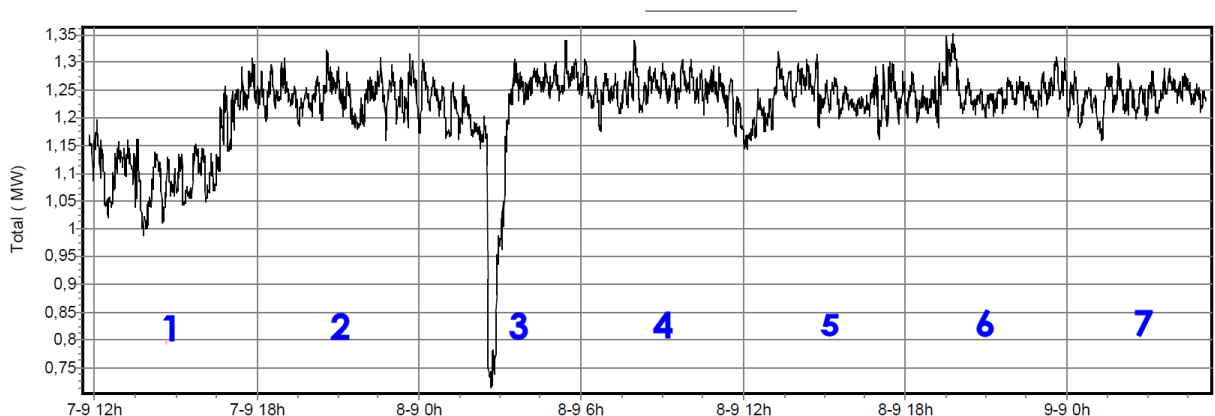
Uge	Produktion, tons			Effekt, kW		Spec. Elfor., kWh/t	
	Extr. H	Extr. F	Extr. C	HT2	HT3	HT2	HT2+HT3
5	273	245	149	1114	884	361,3	503,2
25	180	272	149	964	893	358,3	519,1
26	226	281	185	1081	923	358,2	486,5
28	178	273	186	924	866	344,2	472,1
32	193	263	185	937	870	345,2	473,6
33	251	270	168	1003	892	323,4	462,1
35	201	257	159	968	852	355,1	495,6
39	125	306	185	866	900	337,6	481,6
43	164	307	160	965	889	344,2	493,6
Sum uden	1791	2474	1526	8822	7969	347,5	487,1
44	276	299	93	1094	786	319,6	472,8
45	170	302	137	959	860	341,3	501,8
46	199	310	141	991	872	327,1	481,5
47	216	286	123	1086	815	363,4	511,0
48	287	310	36	1104	714	310,7	482,5
49	193	313	139	1001	849	332,3	481,9
Sum med	1341	1820	669	6235	4896	331,4	488,3

Tabel 1. Extrudernes specifikke elforbrug i 2009 i uger med jævn produktion. Der er opdelt på uger uden filter (øverst) og uger med filter indkoblet

#### 4.3 Målinger september 2010

Målingerne gennemførtes d. 7.-9. september af Henning Højte Hansen, Balslev, og Jonas Kehr, ABB. Målingerne udførtes med ABB's Fluke netanalysator. Ved målingerne koblede et eksternt tidsrelæ filteret skiftevis ind og ud i 10 minutter. Netanalysatoren målte spænding og strøm i de tre faser og beregnede aktiv effekt og effektfaktor (PF) for hver fase med en tidsopløsning på 30 sekunder.

Ved den efterfølgende databehandling er de første og de sidste målinger i hver 10 minutters periode fravalgt, således at der er benyttet perioder på 9 minutter (18 gange 30 sekunder), som er fri for eventuelle indsvingninger fra ind-/udkobling af filteret. Der er opnået 119 perioder med filter og 119 perioder uden filter.



Figur 4. Optagen effekt på HT2 ved målingerne i september 2010

Figur 4 viser lavspændingsinstallationens optagne effekt i måleperioden på 41 timer. Belastningen har (bortset fra dykket i tidsinterval 3) kun varieret lidt i måleperioden, og produktionen har været den samme i hele perioden. Analysen viser, at den optagne effekt er 3,3 kW større med filteret inde end ude.

Som figur 4 viser, har der været et korterevarende dyk i elforbruget og ekstrudernes produktion d. 8. september kl. ca. 3. En gennemgang af måledata viser, at dykket har været større i perioder med filteret ude end inde, hvorfor dykket bør holdes uden for analysen. Uden dykket bliver der 116 perioder uden og med filter, og den optagne effekt er 2,7 kW større med filteret inde end ude. Da filterets egetforbrug er ca. 5,8 kW, svarer det til en elbesparelse i selve installationen på 3,1 kW. Der kan ikke forventes nogen besparelse i belastningen på varmelegemerne og på asynkronmotorerne med frekvensomformer. De 3,1 kW svarer derfor til godt 1% af belastningen på de direkte forsynede asynkronmotorer.

Denne besparelse – som kun er 0,3% af belastningen på TH2 – må anses for ret usikker. Tabel 2 viser således en opgørelse af de målte middeleffekter med og uden filter i de syv tidsintervaller. Det ses, at der i nogle intervaller findes en væsentlig besparelse, mens der i andre findes et væsentligt merforbrug. Havde målingerne således kun omfattet intervallerne 5 og 6 var konklusionen blevet, at der var en signifikant besparelse med det aktive filter. Forskellen skyldes næppe måleusikkerhed, idet der er benyttet samme måleudstyr i hele måleperioden, og de målte værdier kun varieret meget lidt. Forskellen kan derimod måske skyldes, at produktionen ind imellem varierer med intervaller, som nogenlunde svarer til de 10 minutters perioder, som filteret er inde og ude. Det havde derfor været en betydelig fordel, hvis der forelå produktionsdata for hver af de 119 perioder.

Tidsinterval	Middeleffekt, kW		
	med filter	uden filter	Mer-effekt med filter, %
1	1.127	1.121	0,54
2	1.247	1.234	1,04
3	1.190	1.199	-0,78
4	1.259	1.241	1,39
5	1.227	1.244	-1,32
6	1.247	1.243	0,27
7	1.244	1.235	0,70
Interval 1-7	1.219	1.216	0,27

Tabel 2. Målte middeleffekter i de syv tidsintervaller (interval 3 inkl. dykket)

#### 4.4 Opnåede erfaringer

Målingerne hos Færch Plast har vist, at den benyttede måleprocedure med ind- og udkobling af filteret hvert 10. minut samt analysemetoden har været anvendelig. De har også givet den erfaring, at målingerne sikrest udføres med apparater som Fluke netanalysator og Rogowski-spoler, idet spolerne ikke – modsat strømtransformere – påvirkes af magnetfeltet fra installationen.

Målinger af denne type bør ideelt set udføres på installationer, hvor:

- THDU uden filter er større end de 6-7%, der målt hos Færch Plast
- en væsentlig del – helst over 50% - af belastningen er direkte forsynede asynkronmotorer, idet der i disse opstår et modmoment som følge af 5., 11. osv. harmoniske
- filteret kan tilsluttes installationen nær transformeren, så tabene i lavspændingsnettet fra de harmoniske bliver stort set de samme med og uden filter

- produktionen fra det forsynede udstyr kan registreres med samme tidsopløsning som benyttes ved effektmålingerne, således at det specifikke elforbrug med og uden filter kan gøres op.

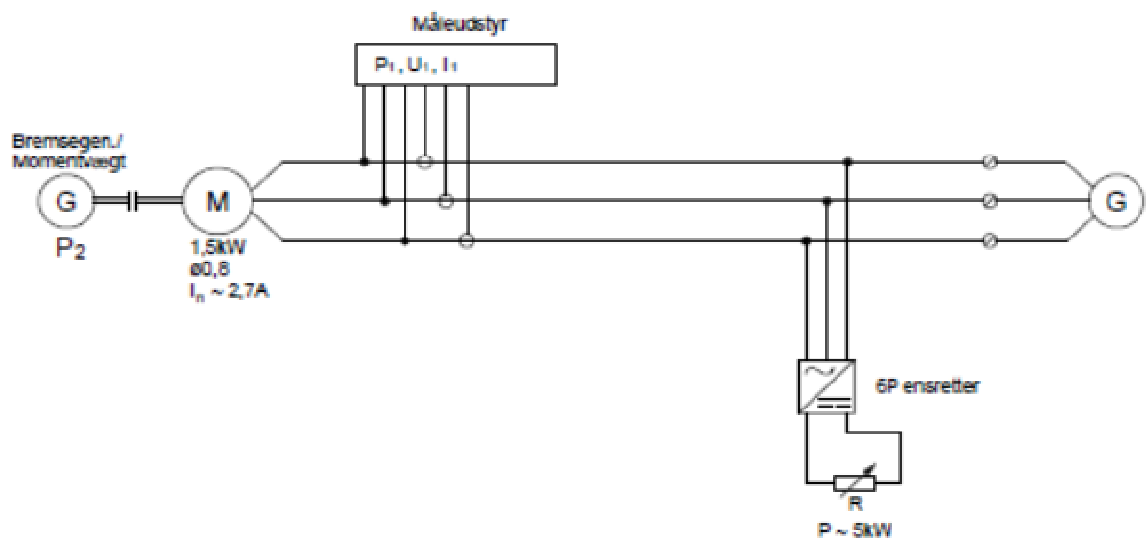
## 5. Målinger i laboratoriet

### 5.1 KME, Københavns Maskinmester- og Elinstallatørscole

Forsøget hos KME blev udført for at verificere harmoniske spændingers indvirkning på tabene i en standart kortslutningsmotor. Forsøget udførtes, fordi det i praktiske undersøgelser og målinger har været vanskeligt at påvise indflydelsen på motoren af det harmoniske indhold i spændingen. Problematikken består i, at det i industrien er svært at opnå en stabilitet, der muliggør en rimelig vurdering af virkningerne.

Deltagerne i forsøgene var Ole Grøndal Schou, KME, Henning Højte Hansen, Balslev A/S og Mogens Johansson, Dansk Energi Analyse A/S.

#### 5.1.1 Forsøgsopstilling



Figur 5. Forsøgsopstilling hos KME

Forsøget udførtes på en 1,5 kW motor, der blev belastet af en momentvægt, hvor moment og omdrejningstal kan måles. Effekt, spænding og strøm til motoren målte, og spænding samt strøm blev opløst i harmoniske komponenter. Motorens moment og omdrejningstal målte ligeledes.

Spændingen blev deformeret med en 6 pulskoblet ensretter med en R-L belastning. Således opnåedes en 5-7, 11-13 og 17-19 harmonisk komponent i spændingen. Størrelsen af de harmoniske bestemmes af R.

For at opnå én enkelt overtone at måle på, var det meningen at benyttes ABB's aktive filter til at optage de harmoniske, som ikke ønskedes tilført motorspændingen. Filteret skulle således styre, hvilke harmoniske motoren blev udsat for. Det viste sig ikke muligt af benytte filteret på denne måde. Derfor benyttedes måleopstilling som figur 5 uden strømgenerator.

Det viste sig dog, at de modstande der var til rådighed ikke kunne belastes fuldt ud, samt at de benyttede mellemtransformere havde for lav kortslutningsimpedans, således at forvrængningen blev for lav til at få realistiske målinger. Forsøget blev derfor afbrudt.



Der blev d. 15. august 2011 foretaget endnu et forsøg, hvortil der var indkøbt en drosselspole, der dog også viste sig at være fejlramt. Det førte til, at vi besluttede at forsyne måleopstillingen fra laboratoriets testgenerator. Resultaterne i afsnit 5.1.2 stammer fra disse målinger.

### 5.1.2 Forsøgsresultater

Belastn. %	Fasespænding U V			Fasestrøm I A			P kW	S kVA	cosφ	PF	Moment Nm	Omdr.tal omdr./min	ΣUh %	ΣI h %
100	230	230	230	3,34	3,36	3,29	1,75	2,29	0,76	0,77	9,9	1460	0,5	0,1
100	230	230	230	3,3	3,3	3,3	1,74	2,36	0,77	0,73	9,9	1441	12,0	20,8
												Harm. orden	Uh %	Ih %
												5.	10,3	20
												7.	2,8	3,2
												11.	4,9	4,2
												13.	2,5	1,9

ΔP=	236,4	W	
ΔPh=	246,1	W	4,1%

η =	0,865
ηh =	0,859

Belastn. %	Fasespænding U V			Fasestrøm I A			P kW	S kVA	cosφ	PF	Moment Nm	Omdr.tal omdr./min	ΣUh %	ΣI h %
50	230	-	-	2,5	-	-	0,923	1,7	0,54	0,54	5,1	1476	-	-
50	230	-	-	2,5	-	-	0,947	1,82	0,54	0,51	5,0	1474	11,9	28,0
												Harm. orden	Uh %	Ih %
												5.	10,4	27
												7.	2,5	4,4
												11.	4,8	5,7
												13.	2,3	2,3

ΔP=	134,7	W	
ΔPh=	175,2	W	30,1%

η =	0,854
ηh =	0,815

Belastn. %	Fasespænding U V			Fasestrøm I A			P kW	S kVA	cosφ	PF	Moment Nm	Omdr.tal omdr./min	ΣUh %	ΣI h %
0	230	-	-	2,11	-	-	0,173	1,475	0,16	-	0	1490	-	-
0	230	-	-	2,1	-	-	0,18	1,52	0,16	-	0	1493	11,6	33,3
												Harm. orden	Uh %	Ih %
												5.	10	32
												7.	2,5	5,5
												11.	5	6,8
												13.	2	2,8

ΔP=	173	W	
ΔPh=	180	W	4,0%

Tabel 3. Måleresultater fra forsøg hos KME. ΔP er tabene ved pågældende belastning uden harmoniske, ΔPh er tabene med harmoniske i spændingen. η er tilsvarende motorvirkningsgraden

### 5.1.3. Konklusion

Data i tabel 3 er optaget med manuelle instrumenter og er visuelt aflæst. Derfor kan resultaterne være behæftet med en væsentlig usikkerhed. Især skal nævnes, at momentvippen indgår i beregningen, og at en afvigelse på 0,1 Nm vil betyde, at det midterste resultat på 30 % større tab reduceres til det halve. Den væsentligste konklusion er derfor, at målingerne giver et fingerpej om, at en kraftig forvrængning (THDU ca. 12%) kan forøge en motors tab med op til ca. 4 %, hvilket for denne motor svarer til af størrelsesordenen 1% af mærkeeffekten.

### 5.2 Målinger hos Teknologisk Institut oktober 2011

Målingerne blev udført d. 18. oktober 2011 med deltagelse af Mogens Johansson, Dansk Energi Analyse A/S, Henning Højte Hansen, Balslev A/S og Mads Peter Rudolph Hansen, Teknologisk Institut.

Det var planlagt at måle på en motor, der blev forsynet fra et net, som var blevet gjort kunstigt svagt ved hjælp af en spole, indkoblet serielt i forsyningsnettet. Det viste sig tidligt i forsøget, at der var en fejl i den tilsluttede reaktorspole, således at den ene vikling blev uforholdsmæssig varm og forsøget måtte afbrydes. Det blev konstateret, at opvarmningen ikke skyldtes fejl i tilslutningen. Spolen blev derfor erstattet af 50 m 5 x 1,5 mm<sup>2</sup> kabel, hvor de tre faseledere blev benyttet. Herefter blev forsøget gennemført som planlagt, men med mindre forvrængning end ønsket.

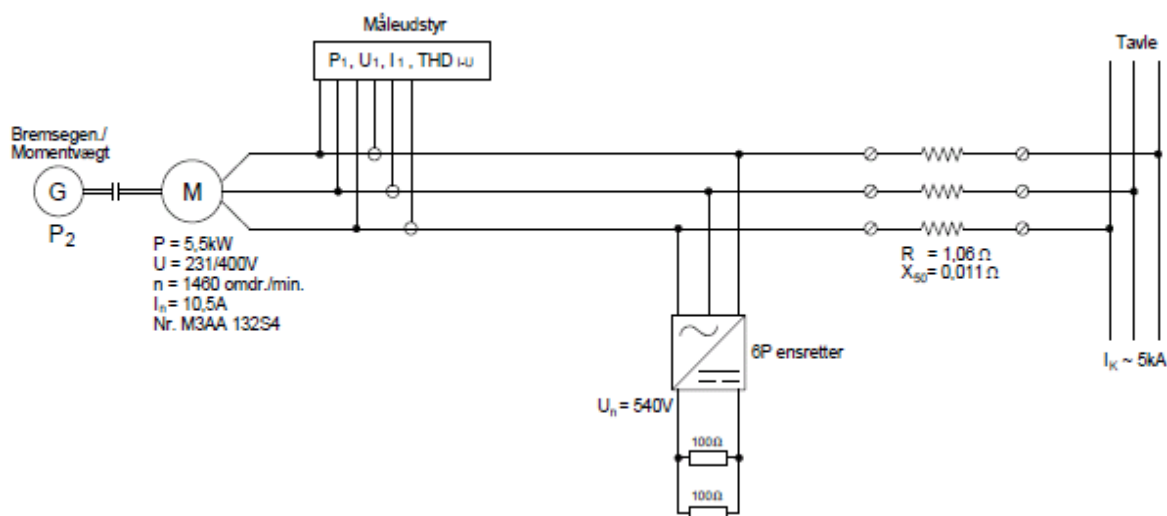
#### 5.2.1 Forsøgsopstilling

Data for måleudstyr og motor:

- Momentvægt
- Spændingsforsyning fra variotransformer
- Effektanalysator Vorltech PM 3000 A
- Der er til visualisering og vejledende målinger benyttet Pico scope 2205.
- Motoren er en ABB standard asynkronmotor P =5,5 kW, 4-polet.

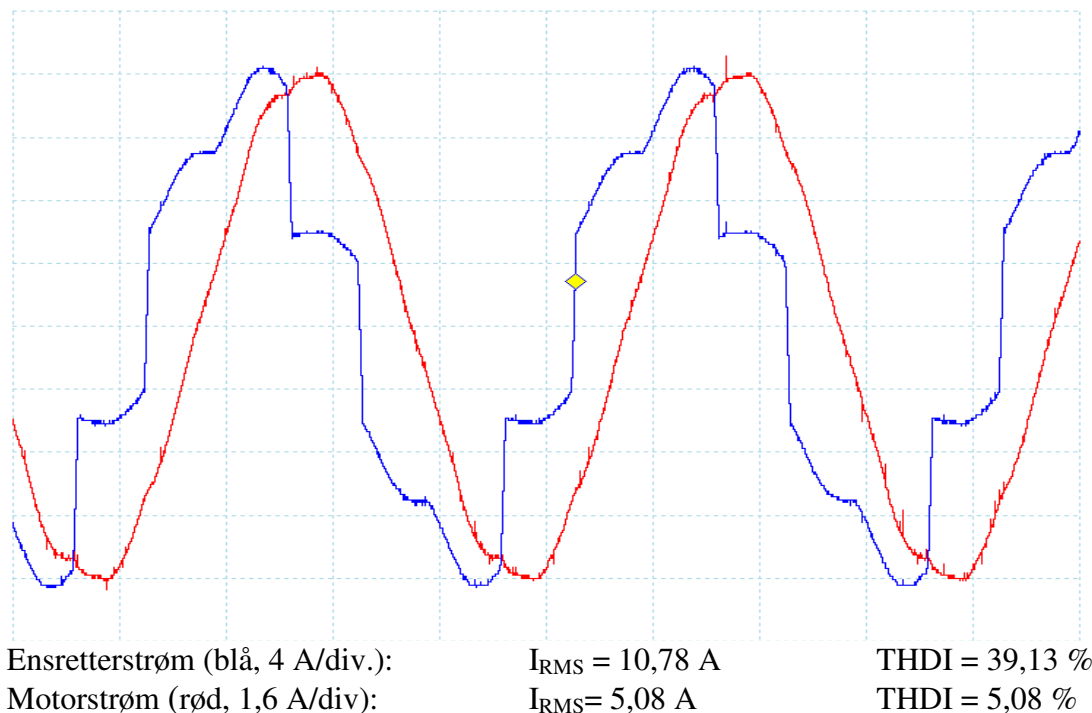
Forsøgsopstillingen er som vist på figur 6. Forsøgsopstillingen består af en 3-faset spændingsforsyning, som separat på hver enkelt fase er regulerbar. Efter denne indkobles en impedans og efter impedansen tilsluttes den motor, som er objektet for undersøgelsen. Parallelt hermed tilsluttes en 6-puls koblet ensretter med ca. 5 kW belastning på DC kredsen. Impedansen i tilslutningen til forsyningsnettet er benyttet for at reducere kortslutningseffekten, således at ensretteren har større mulighed for at deformere spændingskurveformen, når der ønskes en forvrænget spænding.

Resistansen R er med den aktuelle kabellængde målt til 1 ohm ved 6,5 °C, hvilket svarer til 1,06 ohm ved 20 °C. Reaktansen X er 0,011 ohm ved 50 Hz. ( $X_1 = 0,128$  ohm/km,  $R_1 = 12,1$  ohm /km, jfr. NKT katalog).



Figur 6. Forsøgsopstillingen hos Teknologisk Institut oktober 2011

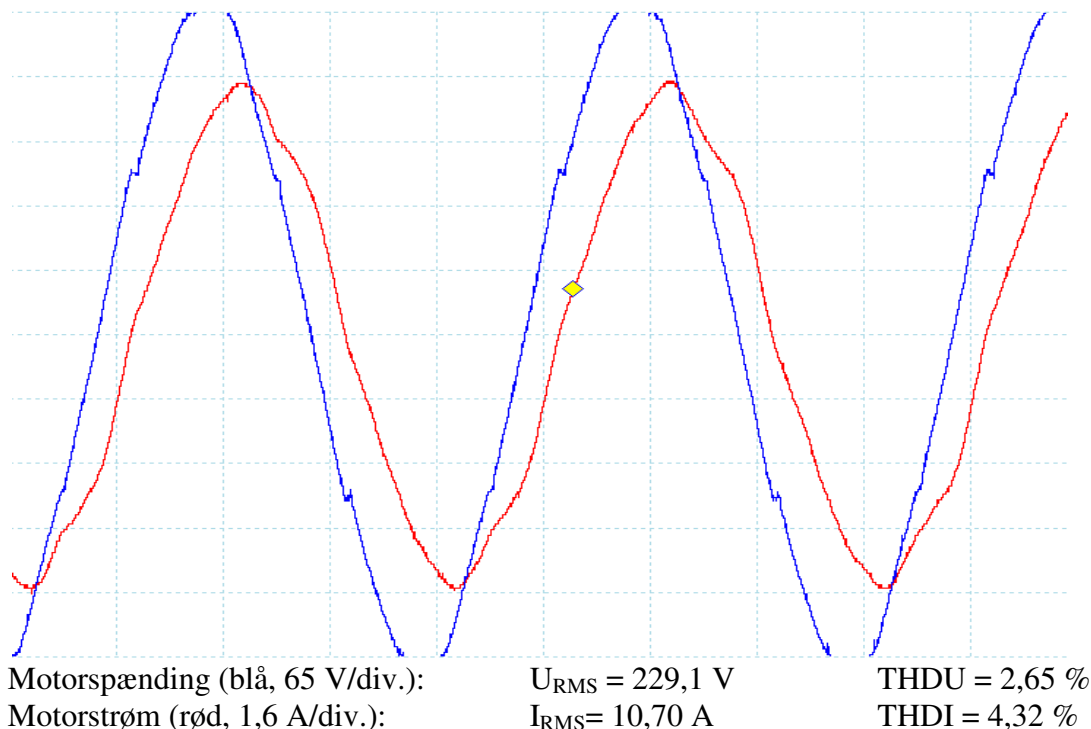
Ensretteren er en almindelig 6 puls koblet ensretter uden udglatningsfilter af nogen art. Ensretteren benyttes udelukkende til at skabe harmonisk forvrængning, således at indflydelsen kan detekteres på motoren. På figur 7 er ensretter- og motorstrøm vist.



Figur 7. Ensretterstrøm og motorstrøm ( $I_1$  i figur 6) ved minimalt forvrænget net. (Tidsakse: 5 msek/div.)

### 5.2.2 Målinger

Målingerne udførtes med motoren forsynet fra minimal forvrænget net, THDU < 1 %, og med kunstigt forvrænget net (ensretteren indkoblet). Ensretteren optager ca. 10 A med en THDI på 39 %, se figur 7. Ved fuld belastning af motoren er der målt 10,7 A som motorstrøm med en forvrængning på THDI = 4,32 % og en spændingsforvrængning på THDU = 2,65 % se figur 8.

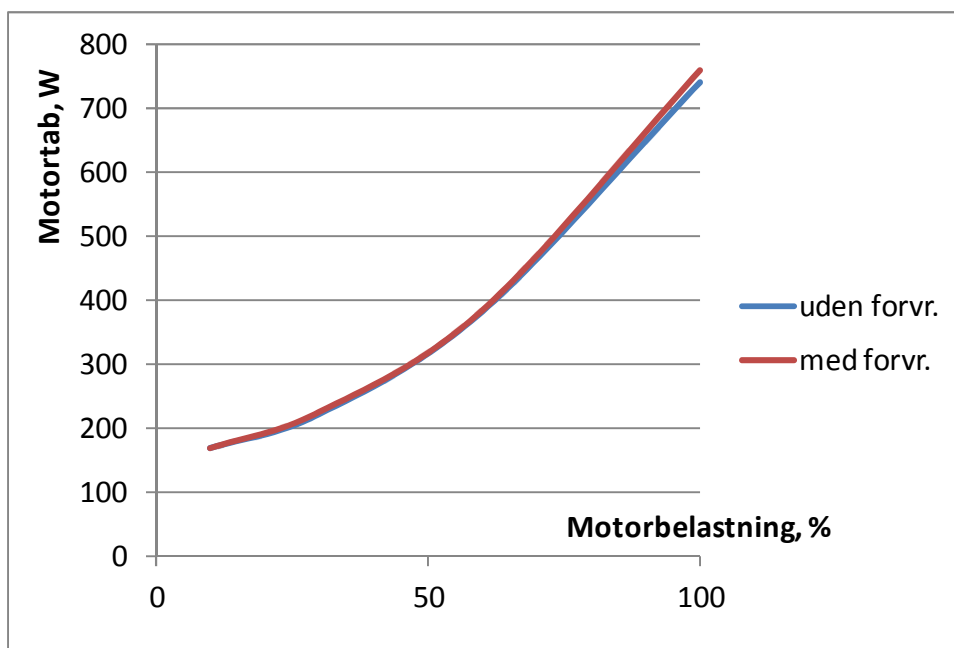


Figur 8. 5,5 kW motorens motorspænding ( $U_1$  i figur 6) og motorstrøm ( $I_1$  i figur 6) ved kunstigt forvrænget net og 100% motorbelastning. (Tidsakse: 5 msek/div.)

Der blev udført målinger med belastninger på 10, 30, 60 og 100 % af 5,5 kW motorens mærkelast. Der er udført 30 målinger i hver belastningssituation, i alt 8 situationer. I tabel 4 er gennemsnittet af hver målesituation indskrevet, og i tabel 5 er motortabene sammenlignet. Figur 9 viser motortabene med og uden forvrængning som funktion af belastningen.

Belastning	Moment [Nm]	$\eta_{tot}$ [%]	Hast. [rpm]	$T_{motor}$ [°C]	Volt [V]	Amp [A]	PF [-]	P_mek [W]	P_elec [W]	Motortab [W]
uden										
10%	3,57	76,6	1485,4	32,8	398,5	4,35	0,24	556,1	725,8	169,7
30%	10,78	88,2	1477,8	30,2	398,4	5,17	0,53	1667,6	1890,2	222,6
60%	21,88	89,8	1467,5	32,0	398,8	7,26	0,75	3362,8	3745,6	382,7
100%	36,00	88,1	1451,2	32,2	398,7	10,70	0,84	5470,3	6210,7	740,4
med										
10%	3,58	76,8	1484,6	31,5	398,6	4,36	0,24	556,5	725,0	168,5
30%	10,75	88,1	1478,2	31,3	398,1	5,16	0,53	1664,3	1889,1	224,9
60%	21,85	89,7	1467,2	34,5	397,6	7,26	0,75	3357,8	3741,9	384,1
100%	35,99	87,8	1449,5	37,7	397,7	10,74	0,84	5462,8	6222,4	759,6

Tabel 4. Måledata ved minimal forvrængning ("uden") og ved THDU på 2,65% ("med")



Figur 9. 5,5 kW motorens tab ved minimal forvrængning (blå) og ved THDU på 2,65% (rød)

Belastning, %	Motortab, W		Forskel i motortab	
	uden	med	W	%
10	169,7	168,5	-1,2	-0,7
30	222,6	224,9	2,3	1,0
60	382,7	384,1	1,4	0,4
100	740,4	759,6	19,2	2,6

Tabel 5. 5,5 kW motorens tab ved minimal forvrængning ("uden") og ved THDU på 2,65% ("med")

### 5.2.3 Konklusion

På grund af den fejllamte reaktorspole kunne der kun genereres en forvrængning på THDU = 2,65% ved fuldlast af motor. Denne forvrængning svarer godt til, hvad der kan forventes på et offentligt net i et industriområde, men for forsøgets skyld havde en væsentlig højere forvrængning været ønskelig for at vise sammenhængen mellem THDU og tab.

Målingerne viser praktisk taget ingen forskel i motortab ved belastninger på 10, 30 og 60%. Kun målingen for 100% belastning viser en forskel på 19 W svarende til 2,6% af motortabene og 0,3% af motorens optagne effekt. Forskellen er dog ubetydelig sammenholdt med måleusikkerheden.

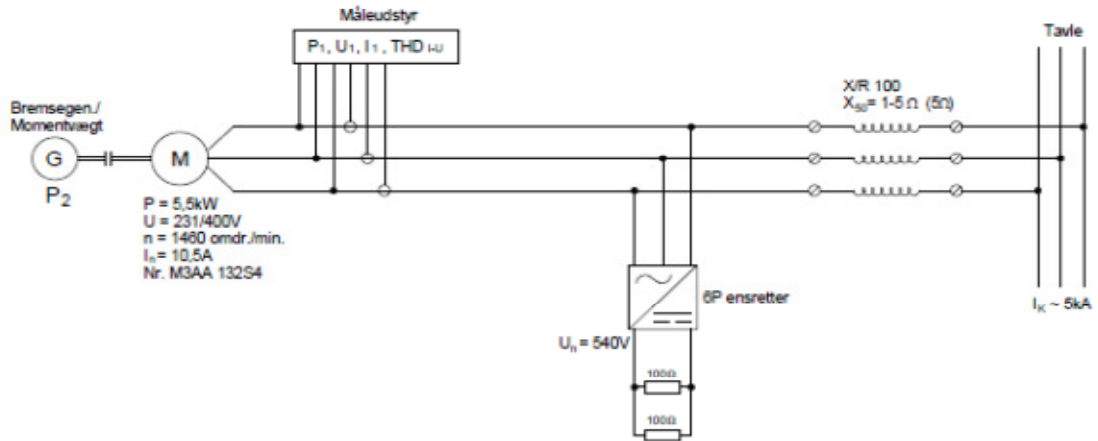
## 5.3 Målinger hos Teknologisk Institut januar 2012

### 5.3.1 Forsøgsopstilling

På grund af den lille forvrængning af forsyningsspændingen i første forsøg hos TI blev det besluttet at udføre endnu et forsøg, idet fejlen i spolen var fundet og rettet. Ved brug af spolen kunne der skabes en større forvrængning og dermed et bedre grundlag for målingerne

Målingerne blev udført d. 31. januar 2012 med deltagelse af Mogens Johansson, Dansk Energi Analyse A/S, Henning Højte Hansen, Balslev A/S og Mads Peter Rudolph Hansen, Teknologisk Institut.

Det var planlagt at måle på samme motor og samme opstilling som ved første måling, som det kan ses nedenfor benyttedes dog drosselspolen med fuld impedans indkoblet på 5 ohm. Spolens fuldlaststrøm er 12 A. Det gjorde det nødvendigt at foretage målingerne ved fuldlast og 80 % belastning af motoren rimeligt hurtigt, idet den samlede strøm her bliver ca. 15 A.

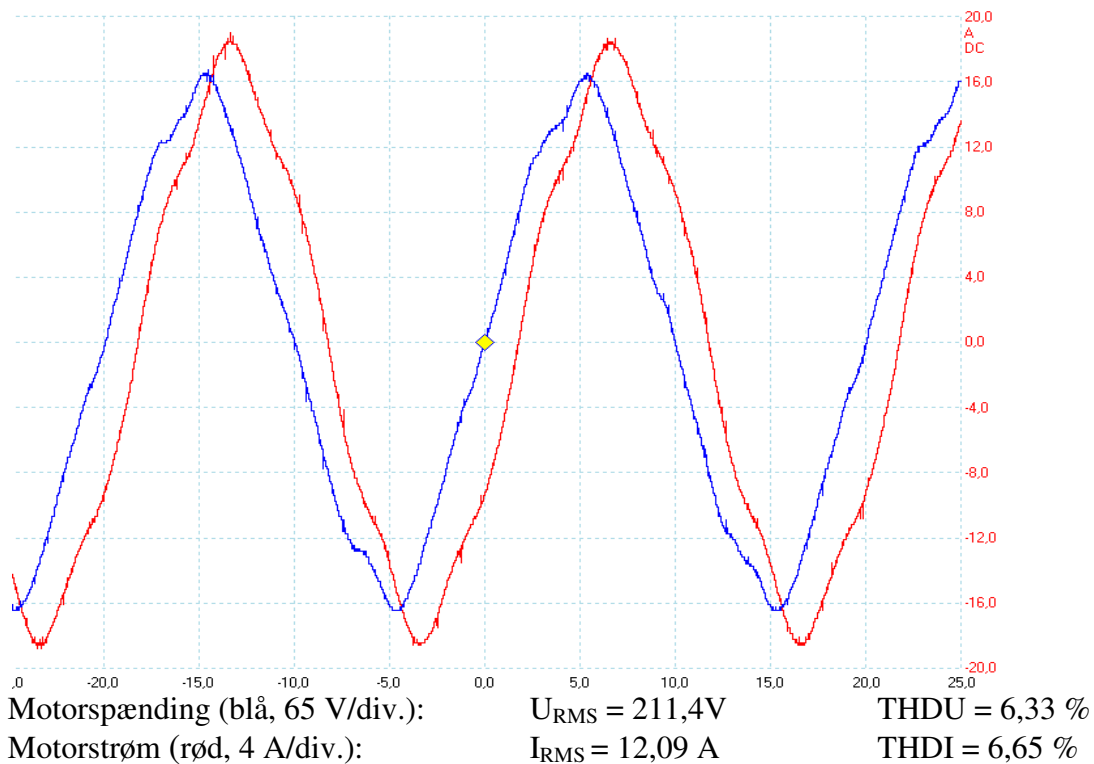


Figur 10. Forsøgsopstilling hos Teknologisk Institut januar 2012

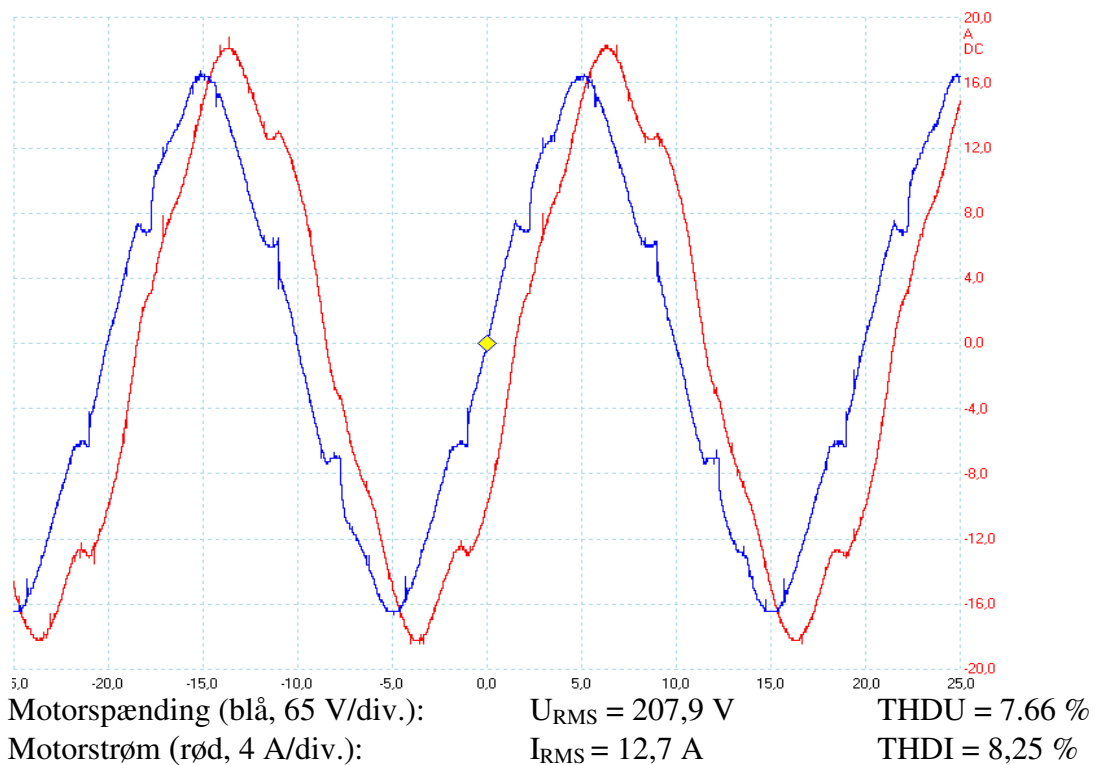
### 5.3.2 Målinger

Målingerne udførtes med motoren forsynet fra forholdsvis meget forvrænget net, THDU = 6,33 % og THDI = 6,65%, se figur 11, selv om forvrængningen ikke var tilstræbt. Desuden målt med kunstigt forvrænget net (ensretteren indkoblet), THDU = 7,66 % og THDI = 8,25%, se figur 12.

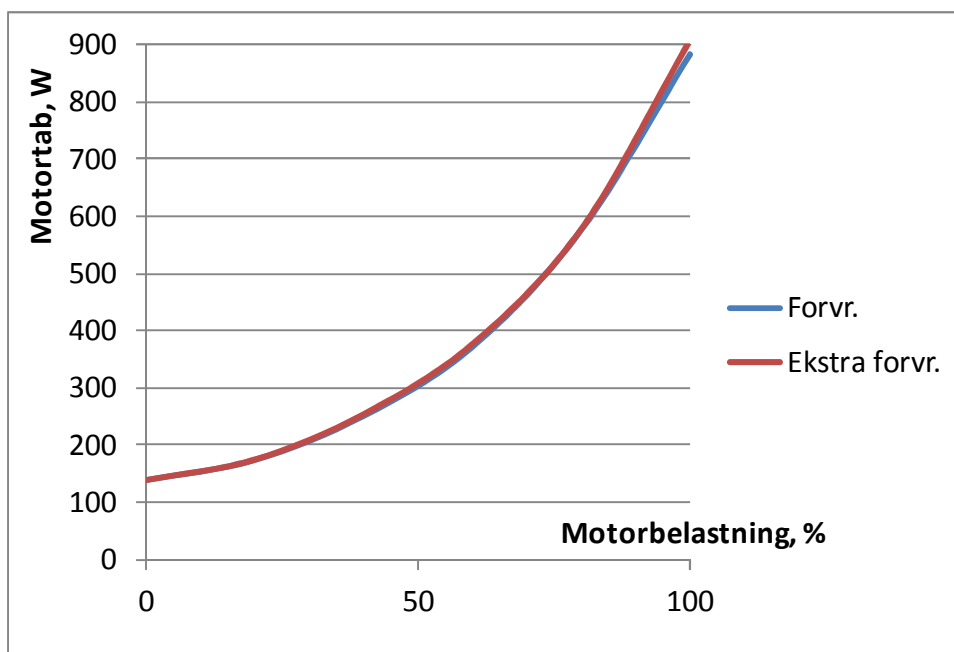
Resultatet af målingerne med og uden ekstra forvrængning fra ensretteren er vist i tabel 6 og figur 13. Tabene er en smule større, op til 3% større, med det kunstigt forvrængede net. (Den absolutte størrelse af motortabene i figur 13 og figur 9 kan ikke sammenlignes direkte, da der er målt ved væsentligt lavere motorspænding i figur 13 end i figur 9).



Figur 11. 5,5 kW motorens motorspænding ( $U_1$  i figur 10) og motorstrøm ( $I_1$  i figur 10) uden kunstigt forvrænget net. 100% motorbelastning. (Tidsakse: 5 msek/div.)



Figur 12. 5,5 kW motorens motorspænding ( $U_1$  i figur 10) og motorstrøm ( $I_1$  i figur 10) ved kunstigt forvrænget net. 100% motorbelastning. (Tidsakse: 5 msek/div.)



Figur 13. 5,5 kW asynkronmotorens tab med forvrængning (blå kurve) og med ekstra forvrængning (rød kurve). Uden korrektion for lav spænding

Belastning %	Motortab P, W		Differens	
	Forvrænget	Ekstra forvr.	W	%
0	137,3	138,2	0,9	0,6%
20	172,7	173,9	1,2	0,7%
40	249,7	253,4	3,7	1,5%
60	370,7	375,9	5,2	1,4%
80	575,0	576,7	1,8	0,3%
100	882,6	906,9	24,3	2,8%

Tabel 6. 5,5 kW motorens tab ved forvrænget net (THDU på 6,33%) og ved ekstra forvrænget net (THDU på 7,66 %)

### 5.3.3 Konklusion

Ved forsøget januar 2012 lykkedes det at frembringe den ønskede forvrængning. Forvrængningen svarer til, hvad der kan findes i et meget hård ramt industrimiljø, og er umiddelbart over, hvad DEFU rekommandation nr. 21 foreskriver, nemlig totalt THDU < 7 % i spændingsforvrængning over alle toner. En strømforvrængning af størrelse 7-8% som ved forsøget vil være normalt i industrimiljø.

Sammenligner man målingen med ekstra forvrængning med forholdene ved ren sinusformet netspænding kan det skønnes, at motortabene ved den ekstra forvrængning (THDU = 7,66%) er 1-8% større end motortabene ved den rene sinusspænding. Det følger af, at tabene som følge af de harmoniske er proportionale med den harmoniske spænding kvadreret (se afsnit 6) samt at THDU kvadreret er ca. 50% større for det kunstigt forvrængede net end for nettet uden kunstig forvrængning.



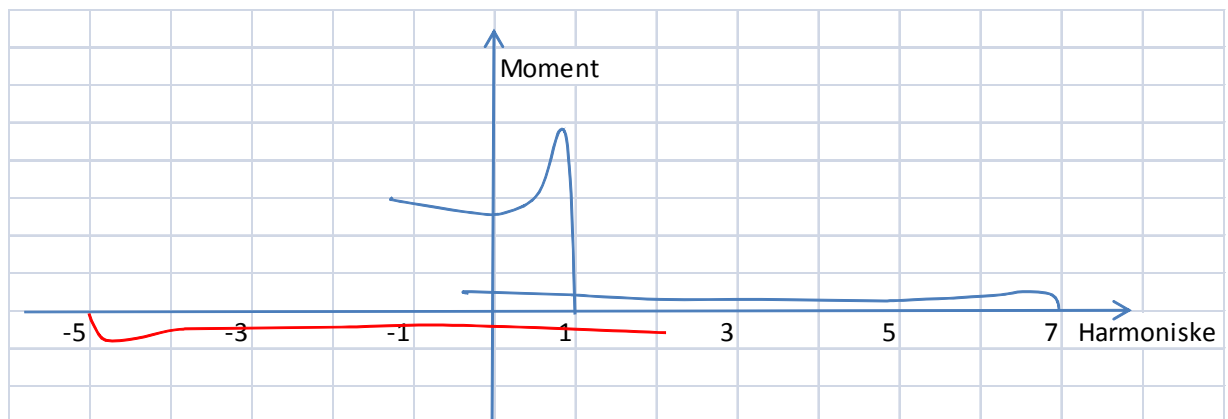
## 6. Analyse af tabene fra harmoniske i asynkronmotorer

De væsentligste harmoniske i forsyningen til en asynkronmotor er normalt 5., 7., 11., 13., 17., 19. osv., som kommer fra 6-puls ensrettere. Tabel 7 viser en oversigt over de resulterende harmoniske i stator og rotor. Eksempelvis den 5. harmoniske vil inducere en strøm i rotoren med en frekvens svarende til den 5. harmoniske plus 1, idet rotoren roterer med grundfrekvensen og modsat den 5. harmoniskes retning.

Harmoniske	Frekvens Hz	Fasefølge i forhold til grundtonen	Stator harmoniske	Omdrejningsretning	Rotor harmoniske
1	50	+	1	Fremad	-
5	250	-	5	Baglæns	6
7	350	+	7	Fremad	6
11	550	-	11	Baglæns	12
13	650	+	13	Fremad	12
17	850	-	17	Baglæns	18
19	950	+	19	Fremad	18

Tabel 7. De væsentligste harmoniskes betydning for asynkronmotoren (ref. 2)

5., 11., 17. osv. harmoniske drejer baglæns og virker bremsende på asynkronmotoren, mens 7., 13., 19. osv. harmoniske trækker fremad ligesom grundtonen, se figur 14.



Figur 14. Momenterne fra 1., 5. (rød) og 7. harmoniske i asynkronmotor

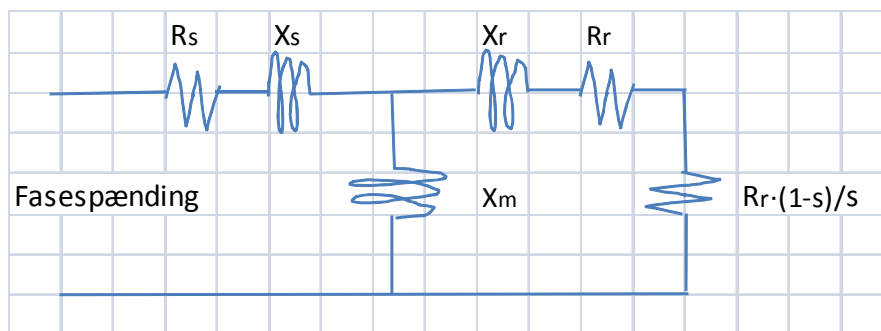
Kører motoren med slippet  $s$ , bliver  $n$ 'te harmoniskes slip

$$s_n = (n \pm (1 - s)) : n \quad (6.1)$$

hvor "+" gælder 5., 11. 17. osv. harmoniske og "-" gælder 7., 13. 19..osv.

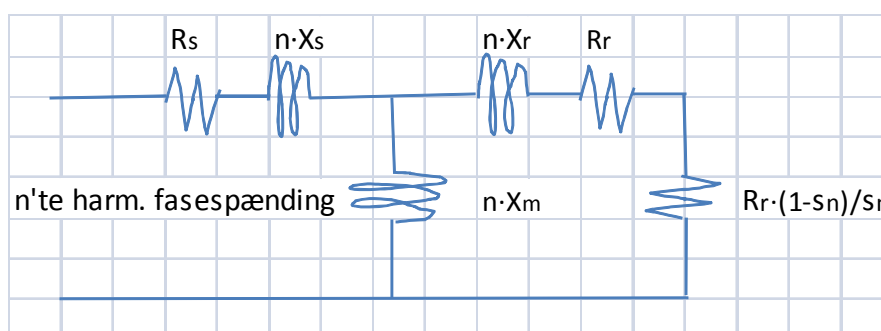
### 6.1 Analyse ud fra ækvivalentdiagrammet

Tabene i asynkronmotoren som følge af de harmoniske kan beregnes ud fra motorens ækvivalentdiagram, som (lidt forenklet) er vist i figur 15. I ækvivalentdiagrammet står indeks  $s$  for statoren og  $r$  for rotoren, mens reaktansen  $X_m$  repræsenterer magnetiseringen. Statormodstanden  $R_r/s$  er i figur 15 opdelt på  $R_r$  og  $R_r \cdot (1 - s)/s$ , der repræsenterer henholdsvis strømvarmetabene i rotoren og motorens mekaniske effekt.



Figur 15. Asynkronmotorens ækvivalentdiagram (pr. fase)

Asynkronmotorens tab fra den n'te harmoniske kan beregnes ud fra den n'te harmoniske fasespænding og ækvivalentdiagrammet, hvor reaktanserne ved n'te harmoniske er n gange reaktanserne ved grundtonen, se figur 16.



Figur 16. Asynkronmotorens ækvivalentdiagram for n'te harmoniske

Slippet  $s_n$  bliver for alle de harmoniske nær 1, og  $(1 - s_n)/s_n$  bliver nær 0, enten negativ (5., 11., 17. osv.) eller positiv. Effekten og dermed momentet fra den n'te harmoniske bliver således meget lille, sammenlignet med grundtonens moment, og bliver enten negativt eller positivt svarende til, at den harmoniske spænding vil trække motoren baglæns eller fremad.

Da reaktanserne  $n \cdot X_s$  og  $n \cdot X_r$  bliver væsentligt større end modstandene ved n'te harmoniske, bestemmes strømmen primært af reaktanserne og den bliver således omvendt proportional med  $n$ . Tabene bliver omvendt proportionale med  $n^2$ , og de 5. og 7. harmoniske bliver særligt vigtige for tabene i asynkronmotoren.

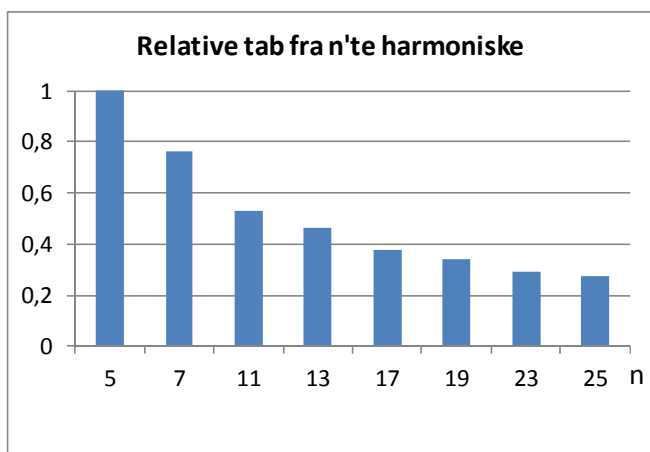
## 6.2 Analyse med eksperimentelt udledt formel

Ref. 5 angiver en formel for tabene  $W_n$  fra den n'te harmoniske spænding  $V_n$ , udledt ud fra eksperimentelle data:

$$W_n \text{ (pu)} = R_n \cdot I_n^2 \approx R \cdot n^{0,5} \cdot (V_n / (X \cdot n^{0,65}))^2 = (R/X^2) \cdot V_n^2 \cdot n^{-0,8} \quad (6.2)$$

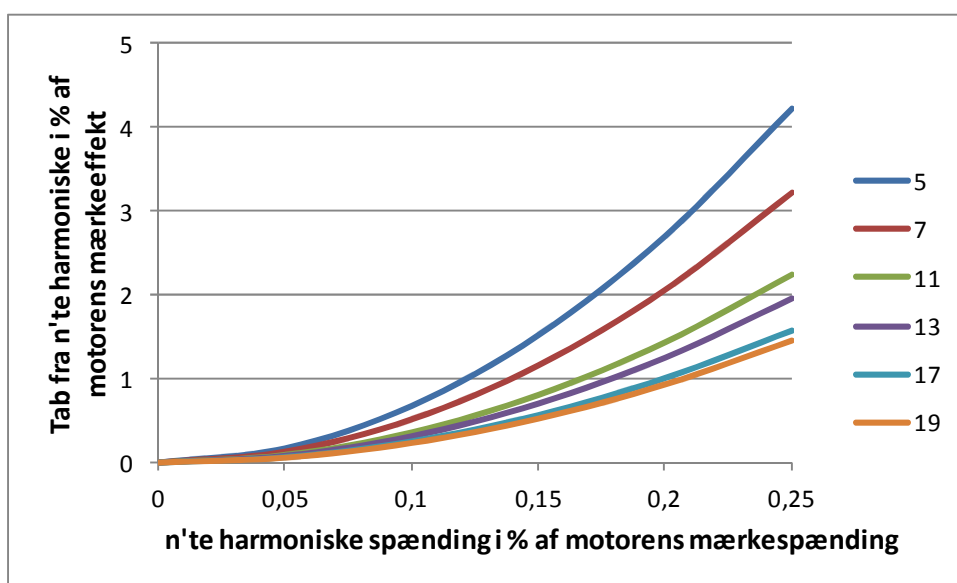
hvor  $R$  er modstanden ( $R_s + R_r$ ) og  $X$  er reaktansen ( $X_s + X_r$ ) for grundtonen, opgjort i pu. Formlen er baseret på ækvivalentdiagrammet, idet der dog er set bort fra reaktansen  $X_m$ . Formlen indikerer, at modstanden på grund af strømfortrængning øges med kvadratroden af  $n$ , mens reaktansen øges med noget mindre end  $n$ , hvor den ellers normalt antages proportional med  $n$ . Formlen, baseret på eksperimentelle data, giver således et tab, som er omtrent faktoren  $n^{1,2}$  større, end en beregning ud fra figur 16 giver.

For en given motor vil tabene fra de harmoniske ifølge formelen afhænge af den harmoniske spænding i anden potens samt af den harmoniskes nummer i potensen  $-0,8$ . Sidstnævnte afhængighed er vist i figur 17.



Figur 17. Tabene i asynkronmotor fra n'te harmonisk spænding i funktion af den harmoniskes nummer (ref. 5). Alle n'te harmoniske spændinger er forudsat ens

I figur 18 er tabene beregnet med formel (6.2) for den 5,5 kW motor, der er beskrevet i afsnit 7. Lige som figur 17 viser figur 18, at tabene ved en given n'te harmonisk spænding er størst for 5. harmoniske. Desuden viser figuren, at først ved en 5. harmonisk spænding på 24% (55 V) bliver tabene fra denne harmoniske 4% af mærkeeffekten eller – for 5,5 kW motoren på 7245 VA – 290 W.

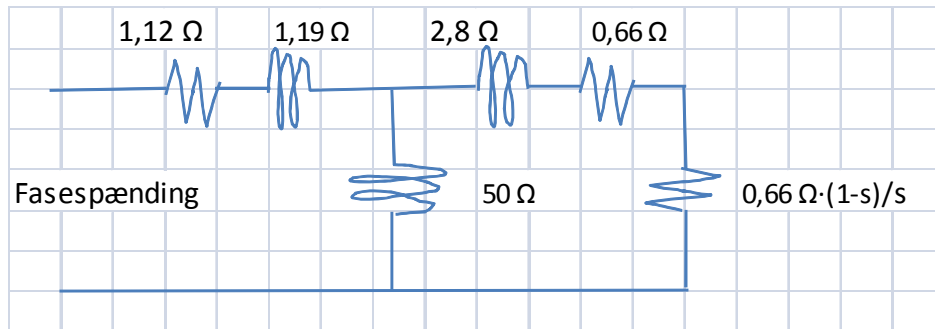


Figur 18. Tabene i 5,5 kW asynkronmotor som følge af en n'te harmonisk spænding

En beregning ud fra motorens ækvivalentdiagram (figur 16) eller ud fra formel (6.2) afhænger ikke af motorens belastning i øvrigt. Målingerne viser derimod, at tabene fra den harmoniske spænding vokser med voksende motorbelastning, se figur 9 og 13. Vi har ingen forklaring på denne forskel mellem teori og målinger.

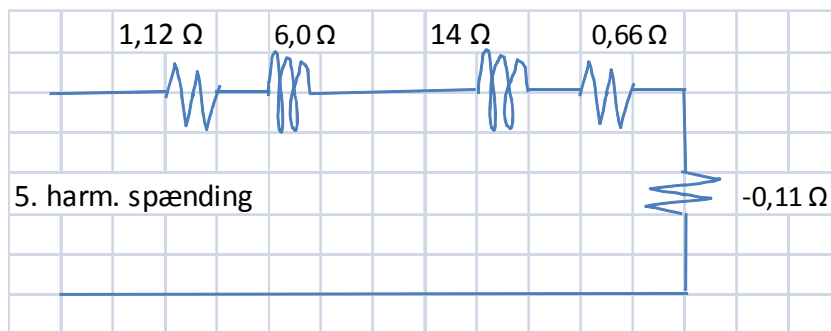
## 7. Beregning af tabene fra 5. harmoniske i 5,5 kW asynkronmotor

Beregningen udføres for den 5,5 kW 4-polede asynkronmotor, som der er målt på hos TI, se afsnit 5.2 og 5.3. Motorens ækvivalentdiagram er vist i figur 19.



Figur 19. Ækvivalentdiagram for 5,5 kW asynkronmotor

Et forenklet diagram for den 5. harmoniske – jævnfør figur 16, men uden  $X_m$  - er vist i figur 20. Slippet  $s_5 = (5 + (1 - s)) : 5 = 1,2$ , når motoren kører i det normale arbejdsområde og  $s$  er nær 0.



Figur 20. Forenklet ækvivalentdiagram for 5,5 kW motorens 5'te harmoniske

Ved en 5'te harmonisk spænding på 5% af fasespændingen eller 11,5 V bliver strømmen

$$I_5 \approx V_5 / X = 11,5 \text{ V} / 20 \Omega = 0,58 \text{ A}$$

Strømvarmetabene (kobbertabene) pr. fase beregnes som

$$W_{cu} = (R_r + R_s) \cdot I_5^2 = (1,12 + 0,66) \Omega \cdot 0,58^2 \text{ A}^2 = 0,60 \text{ W}$$

Strømvarmetabene fra en 5'te harmonisk spænding på 5% beregnes således til 1,8 W. Hertil kommer akseffekten på

$$W_{aksel} = (R_s \cdot (1 - s_5) / s_5) \cdot I_5^2 = -0,11 \Omega \cdot 0,58^2 \text{ A}^2 = -0,037 \text{ W/fase}$$

eller i alt -0,1 W, svarende til at effekten er bremsende. De samlede tab beregnes således til 1,9 W eller 0,03% af motorens mærkeeffekt.

For at beregne tabene ud fra formel (6.2) udregnes impedanserne i pu (idet motorens mærkespænding er 230 V og mærkestrømmen er 10,5 A og mærkeeffekten er 5500 W):

$$\begin{aligned} Z_{base} &= 230 \text{ V} / 10,5 \text{ A} = 21,9 \Omega = 1 \text{ pu} \\ R &= R_s + R_r = 1,12 + 0,66 \Omega = 0,081 \text{ pu} \\ X &= X_s + X_r = 1,19 + 2,8 \Omega = 0,182 \text{ pu} \end{aligned}$$

For en 5'te harmonisk spænding  $V_n$  på 5% eller 0,05 pu beregnes tabene med formel (6.2) til:

$$W_5 = (0,081 / 0,182^2) \cdot 0,05^2 \cdot 5^{-0,8} = 0,0017 \text{ pu} = 9 \text{ W}$$

Tabene beregnet efter formel (6.2) bliver således 5 gange større end tabene beregnet ud fra ækvivalentdiagrammet.

De 9 W i tab fra en 5. harmonisk spænding på 5% er af samme størrelsesorden som de målte tab i tabel 6. (I tabel 6 er tabene opgjort som forskellen i tab ved THDU'er på 7,66% og 6,33%. Da  $7,66^2 - 6,33^2 = 18,6$  og  $5^2 = 25$  vil tabsforskellen i tabel 6 svare til, hvad der findes i en motor med en THDU på 4-5%).

## **8. Referencer**

1. Forundersøgelse af muligheder for energibesparelser i erhvervslivet ved reduktion af overharmoniske strømme. Dansk Energi Analyse. August 2009
2. IEEE Recommended Practices and Requirement for Harmonic Control in Electric Power Systems. IEEE 1993. (Afsnit 6. Effects of Harmonics)
3. Eugen A. Klingshirn and Howard E. Jordan. Polyphase Induction Motor Performance and Losses on Nonsinusoidal Voltage Sources. IEEE. March 1968
4. G. C. Jain. The Effect of Voltage Waveshape on the Performance of a 3-phase Induction Motor. June 1964
5. A. Jalilian et al. Performance of a 7,5 kW Induction Motor under Harmonically Distorted Supply Conditions. IEEE. 2000
6. Comparative Energy Measurements on an Extrusion Line with and without Active Filter. Labo Lemcko. 5-6-2006. (ABB internally)

## **Bilag 1. Målerapport fra Færch Plast**

### **1. Forord**

I forbindelse med tidligere målinger, foretaget den 22. juni 2010 hos Færch Plast, var der konstateret, at det harmoniske filter medførte besparelser. Besparelserne var dog minimale, 1,3% til 5 % af den optagne effekt fra transformere HT2k.

På grund af besparelsens ustabilitet og det forhold, at der fandtes en måling, der ikke udviste nogen besparelse, med derimod et forøget effektoptag, blev det besluttet at foretage en ny, supplerende måling.

Den supplerende måling blev gennemført den 6.-7. september 2010, hvor Jonas Kehr (ABB) og Henning Højte Hansen (Balslev) var tilstede. Yderligere blev målt til 9. september, hvor Jonas Kehr hentede måleudstyret.

Filteret var indstillet således, at det ville fjerne 5. 7. 11. og 13. harmoniske. Målingerne blev udført med skiftevis ca. 10 minutter filter inde og 10 minutter filter ude. Intervallerne blev styret af et eksternt tidsrelæ. Der blev målt med Fluke netanalysator (ABB) og Dosena (Balslev).

Det konstateredes hurtigt, at de to instrumenter ikke viste samme måleværdier, idet Balslevs Dosena-instrument viste en betydelig skæv belastning. Yderligere konstateredes det, at afvigelsen på Dosena var afhængig af feltstyrken omkring faselederne og specielt var frekvensafhængig. Fluke strømmålingen var baseret på Rocovskispoler, der ikke er følsom overfor magnetisk feltstyrke. Målingerne blev derefter baseret på Fluke instrumentet.

### **2. Målinger**

Omstående afsnit 5 til 8 med uddrag fra målingerne udført i tidsrummet fra 7.sept. 11:45 til 9.sept. 06:00 indeholder følgende :

- Afsnit 5 Angiver effekten i måleperioden, inddelt i 7 tidsrum.
- Afsnit 6 Middel P [kW], middel PF (effektfaktor) samt middel strøm og spænding for hele måleperioden. Værdierne for de tre faser er vist, og for effekt samt effektfaktor er summen af de tre faser også vist.  
Datafilen er tilrettet således, at der er opnået 119 perioder af 18 x 30 sek. med filter og samme uden filter. Den benyttede måletid i hver af de 119 perioder er 18 x 30 sek., idet første og sidste 30 sekunders måling i hver periode er udeladt.
- Afsnit 7 Som afsnit 6, men for tidsrum 4.
- Afsnit 8 Som afsnit 6, men for tidsrum 5.

### **3. Måleresultater**

#### **Hele perioden**

Over hele perioden er den samlede effekt ved drift af filter steget 3,3 kW eller 0,271 %, hvilket er så lidt, at det ikke indikerer nogen sikker virkning af filteret i installationen. Dog skal nævnes, at filterets forbrug på ca. 5,85 kW er indregnet.

Effektfaktoren er generelt steget i hele perioden med filter indkoblet fra 0,921 til 0,931.

Spænding og strøm er generelt lavere med filteret indkoblet; spændingen 1,7 % og strømmen 0,5 til 1,5 %.

#### **Tidsrum 4**

Den optagne effekt fra nettet stiger 18,2 kW eller 1,47 % ved brug af filter. Effektfaktoren stiger som tidligere ved brug af filter. Spændingen falder 0,5% ved brug af filter. Strømmen stiger 1,5%.

#### **Tidsrum 5**

Den optagne effekt fra nettet falder 17,8 kW eller 1,43 % ved brug af filter. Effektfaktoren stiger som tidligere ved brug af filter, men mere markant end i periode 4. Spændingen stiger generelt ca. 0,1 %, og strømmen falder 3 %.

#### **Effektens stabilitet**

På side 12 er effekten udskrevet over 5 timer. Der ses relativt små variationer.

#### **4. Konklusion**

På grund af de korte måleintervaller (10 min.) og de ganske mange målinger, som er optaget over et langt tidsforløb, forudsætter vi, at den belastningsmæssige afvigelse, som der er mellem de enkelte målinger, tidsmæssigt er udbalanceret.

Konklusionen nedenfor er baseret på målingerne over hele tidsperioden på 1dg 17 timer og 12 minutter. Målinger af effekten i denne periode viser, at effekten ikke ændres væsentligt, når filteret er indkoblet. Afvigelsen er en stigning på 0,27 %, hvilket må tolkes som ingen ændring.

PF powerfaktoren stiger ved indkobling af filteret med ca. 1,08 %, hvilket virker naturligt på grund af, at filteret udkompenserer de harmoniske strømme, således at strømmen bliver mindre.

Spændingen reduceres ved filterets indkobling med 0,14 %, samtidig reduceres strømmen med ca. 0,87%

En beregning af effekten ud fra spænding, strøm og PF viser, at der er et ekstra effektforbrug på 0,067% ved filter indkoblet. Det skal sammenholdes med de målte 0,27 %.

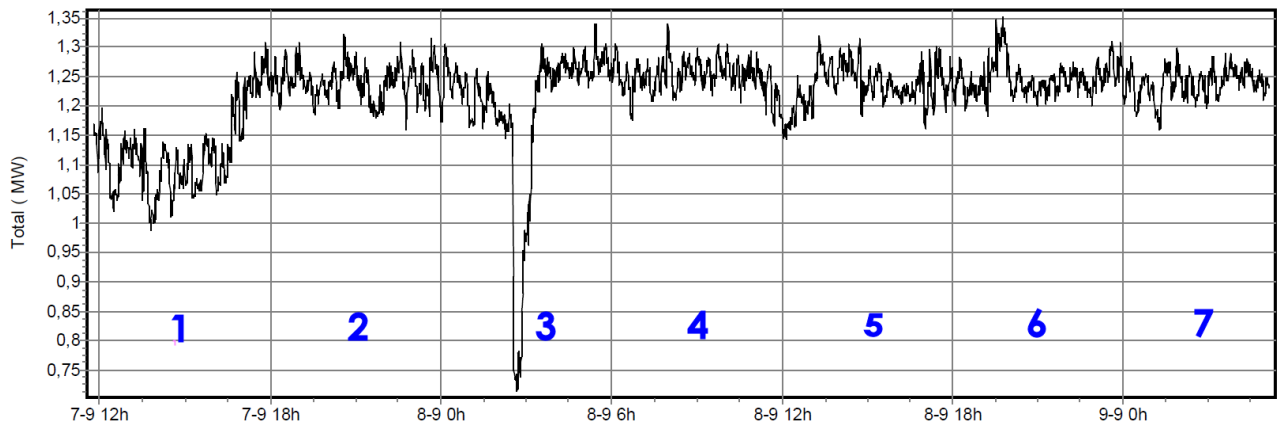
De ekstra 0,27% effekt med filteret inde betyder, at der mistes 3,3 kW ved indkobling af filteret. Hertil skal nævnes, at filteret forbruger 5,8 kW. Den tilsyneladende besparelse på 2,5 kW ved at fjerne de harmoniske strømme koster således 5,8 kW, så det er ikke fordelagtigt.

Det må konstateres, at der ikke er fundet noget relevant besparelsespotential, der retfærdiggør installation af et filter til begrænsning af de harmoniske strømme i den aktuelle installation.

Ovenstående konklusion gælder naturligvis kun den aktuelle installation. Beslutes det i en konkret virksomhed at installere filtre for at rette op på en dårlig netkvalitet på grund af harmonisk forvrængning, kan der måske som en sidegevinst opnås en mindre elbesparelse.



## 5. Oversigt over måleperioden

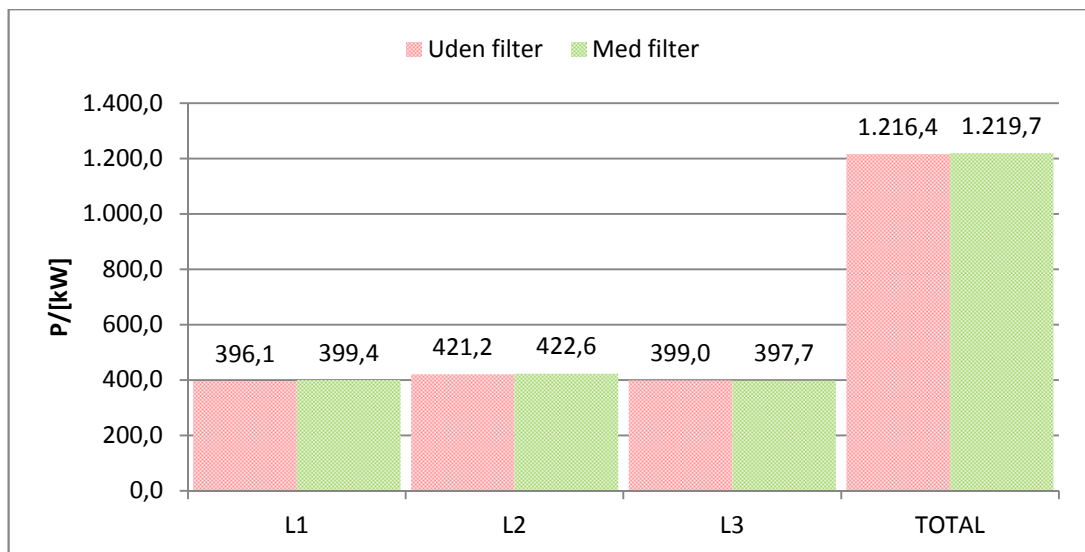


Oversigt over måleperioden på i alt 1 dg 17 h 12 min.

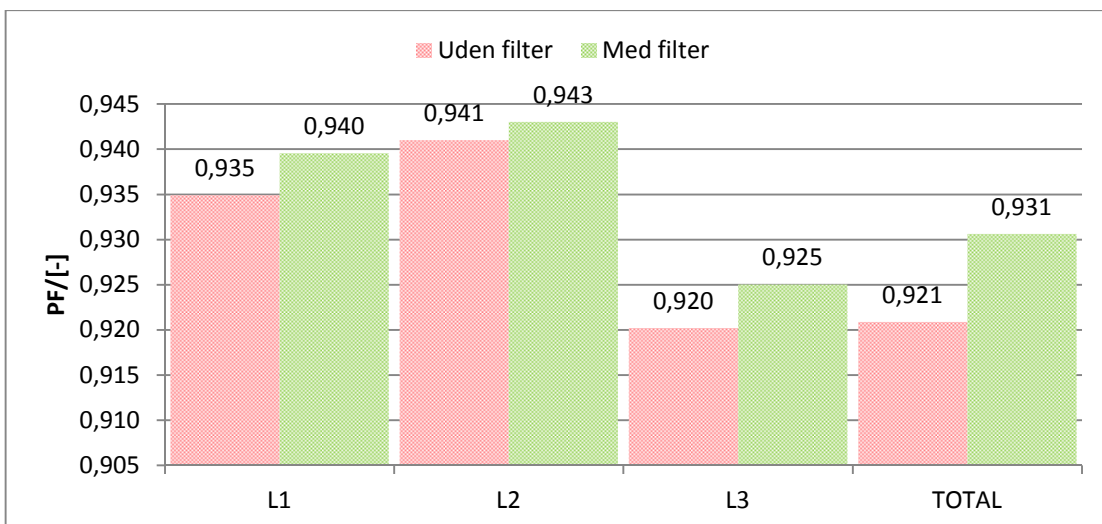
## 6. Middel kurver for hele måleperioden (1 dg 17 h 12 min)

Uden filter 9×10 min + 110×10,5 min, i alt 119 perioder. 18 stk 30 sek perioder udtaget fra hver.

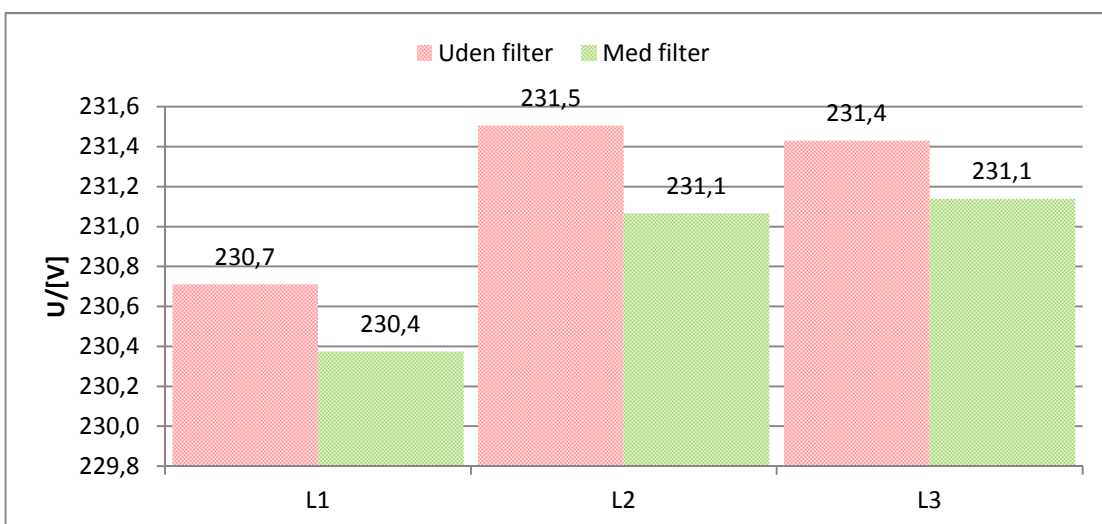
Med filter 45×10 min + 74×10,5 min, i alt 119 perioder. 18 stk 30 sek perioder udtaget fra hver.



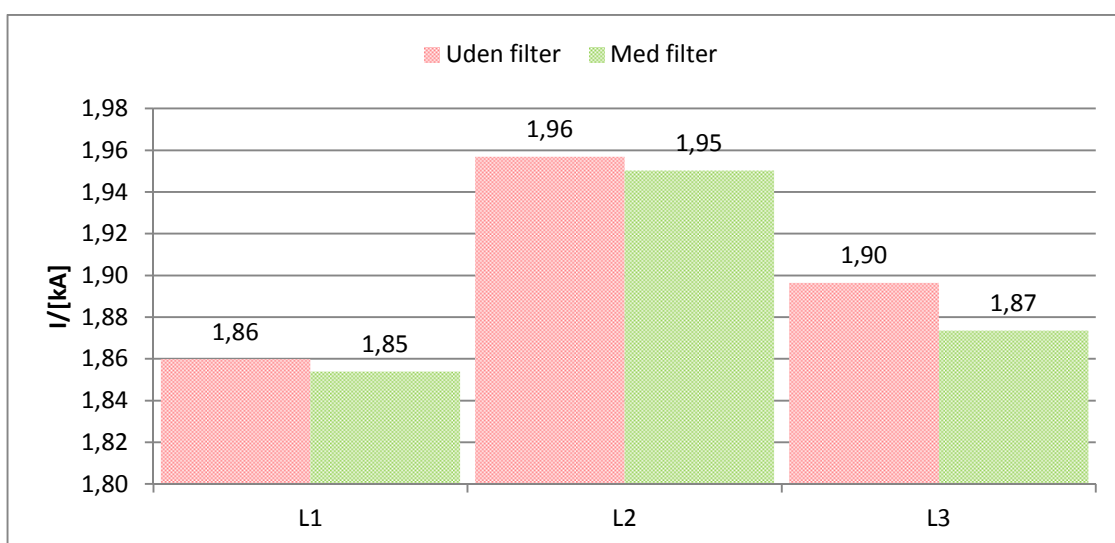
Middel P fra ca. kl. 12:00 den 7/9-2010 til ca. kl. 5:00 den 9/9-2010



Middel PF fra ca kl. 12:00 den 7/9-2010 til ca kl. 5:00 den 9/9-2010



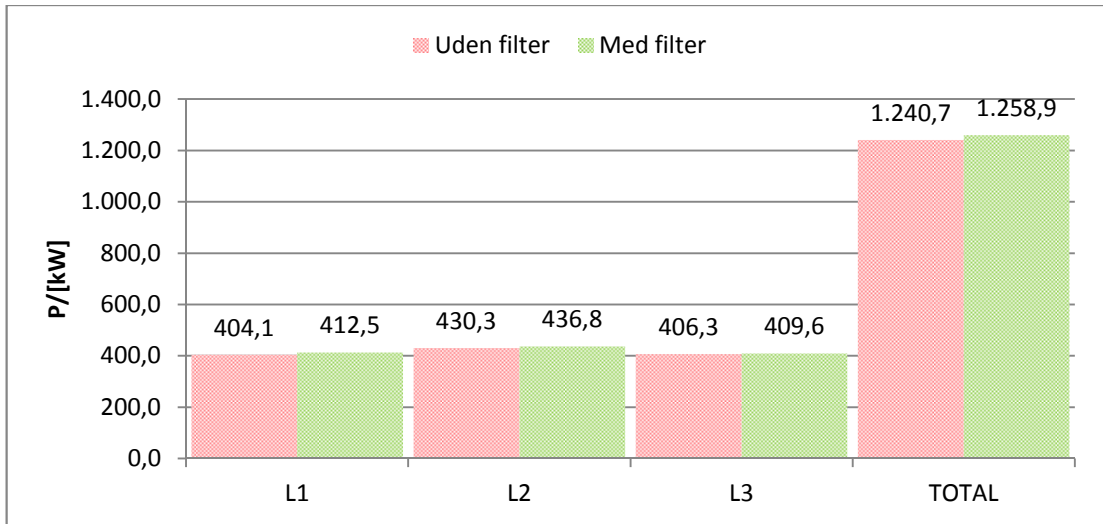
Middel U fra ca kl. 12:00 den 7/9-2010 til ca kl. 5:00 den 9/9-2010



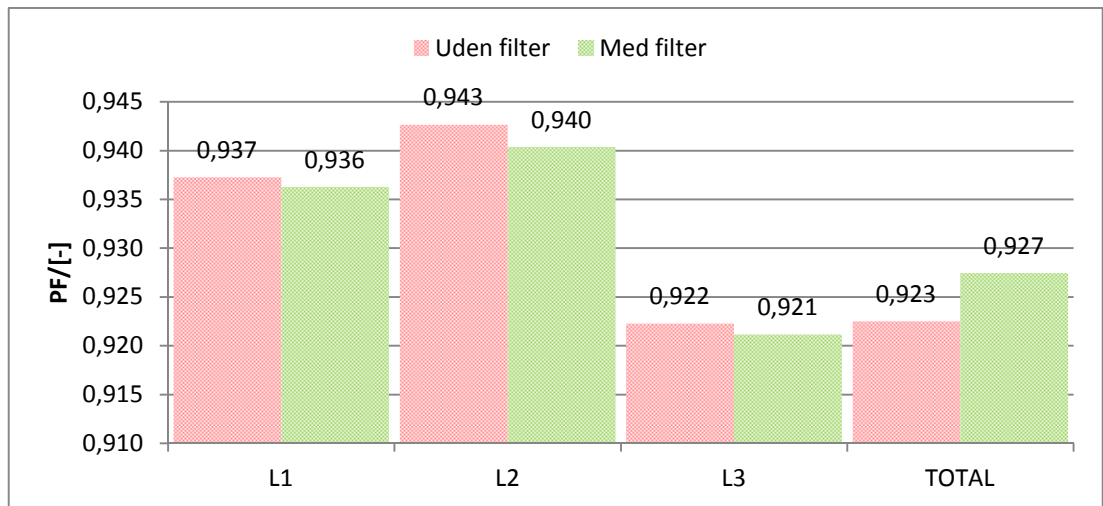
Middel I fra ca kl. 12:00 den 7/9-2010 til ca kl. 5:00 den 9/9-2010

### 7. Middel kurver for tidsrum 4 (ca 6 h)

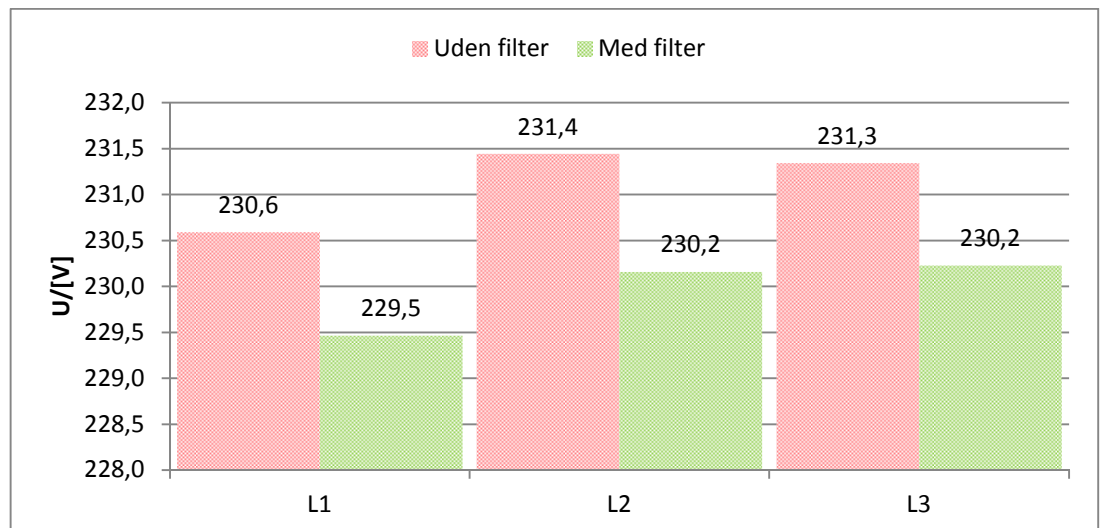
Uden filter 2×10 min + 16×10,5 min, i alt 18 perioder. 18 stk 30 sek perioder udtaget fra hver.  
 Med filter 6×10 min + 12×10,5 min, i alt 18 perioder. 18 stk 30 sek perioder udtaget fra hver.



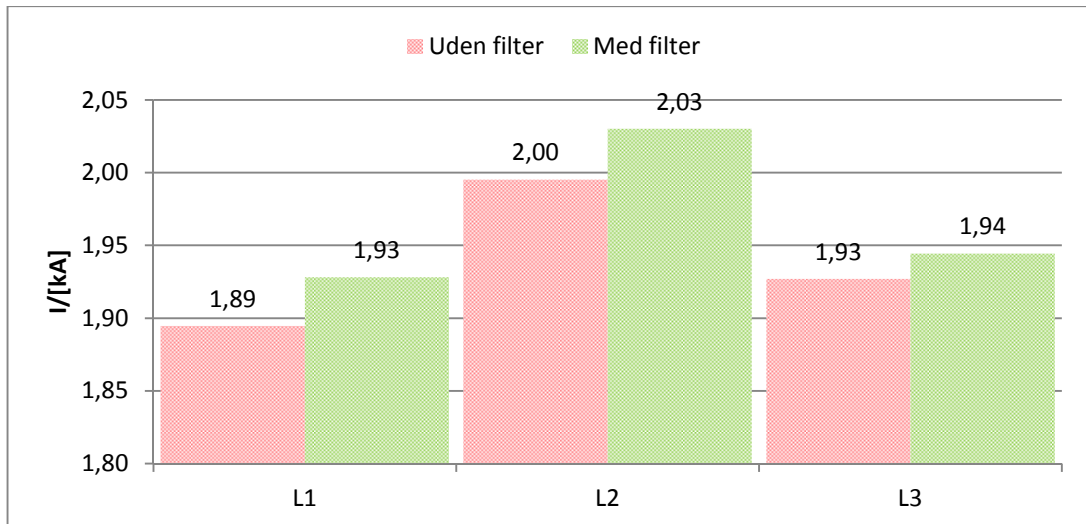
Middel P fra kl. 5:51:40 den 8/9-2010 til kl.12:05:10 den 8/9-2010



Middel PF fra kl. 5:51:40 den 8/9-2010 til kl.12:05:10 den 8/9-2010



Middel U fra kl. 5:51:40 den 8/9-2010 til kl.12:05:10 den 8/9-2010

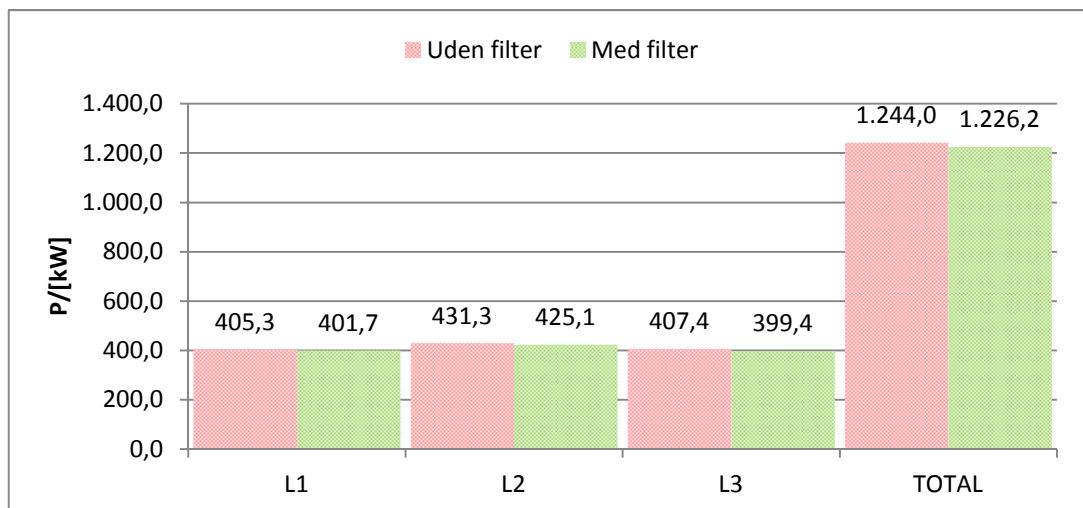


Middel I fra kl. 5:51:40 den 8/9-2010 til kl.12:05:10 den 8/9-2010

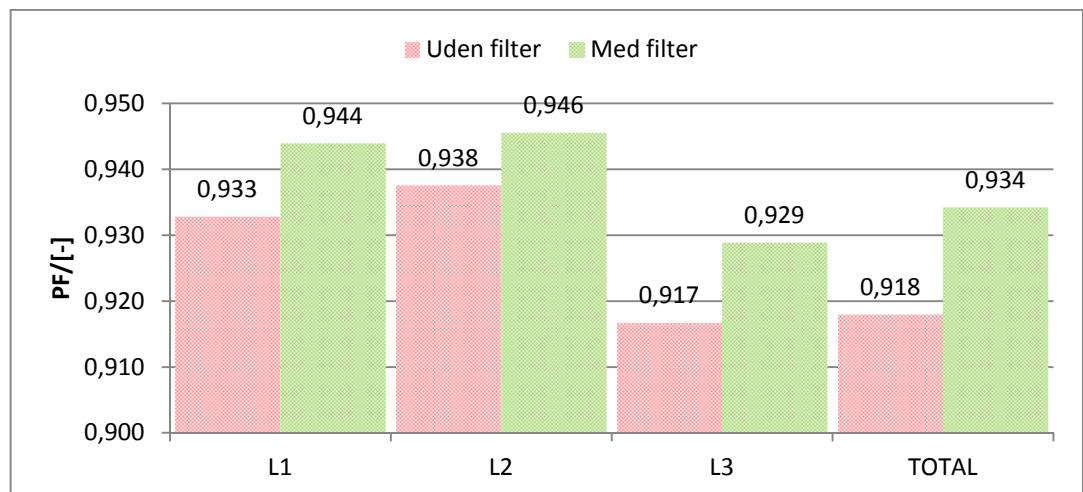
### 8. Middel kurver for tidsrum 5 (ca 6 h)

Uden filter 17×10,5 min, i alt 17 perioder. 18 stk 30 sek perioder udtaget fra hver.

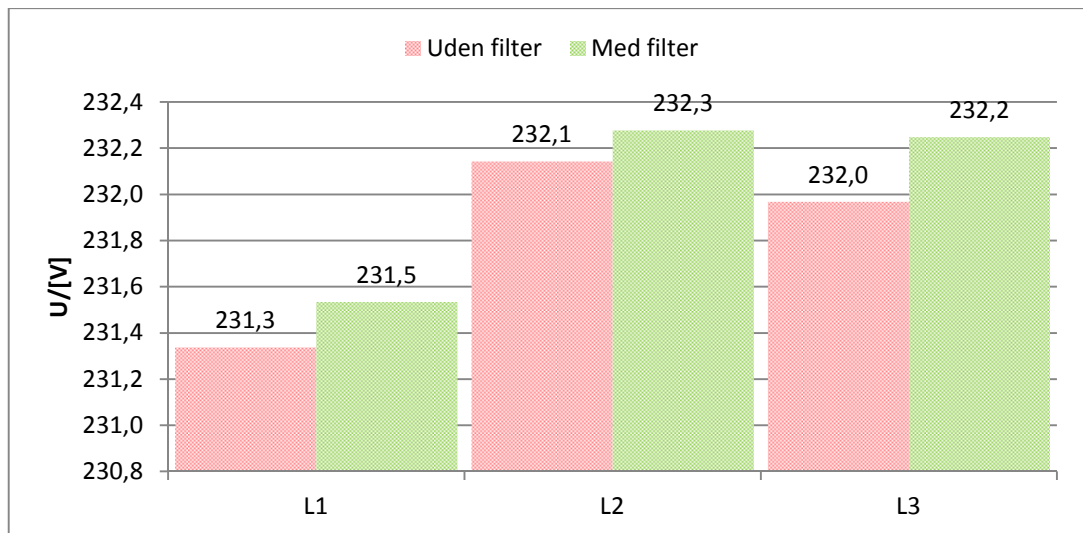
Med filter 8×10 min + 9×10,5 min, i alt 17 perioder. 18 stk 30 sek perioder udtaget fra hver.



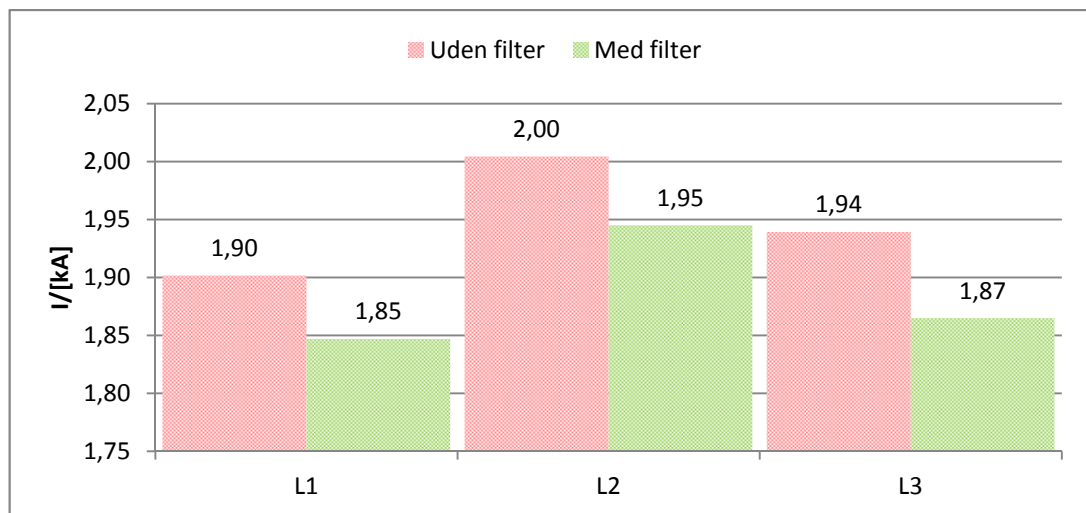
Middel P fra kl. 12:05:40 den 8/9-2010 til kl.17:58:10 den 8/9-2010



Middel PF fra kl. 12:05:40 den 8/9-2010 til kl.17:58:10 den 8/9-2010



Middel U fra kl. 12:05:40 den 8/9-2010 til kl.17:58:10 den 8/9-2010



Middel I fra kl. 12:05:40 den 8/9-2010 til kl.17:58:10 den 8/9-2010

## 9. Effekten i tidsrum 5, ca 6 timer

