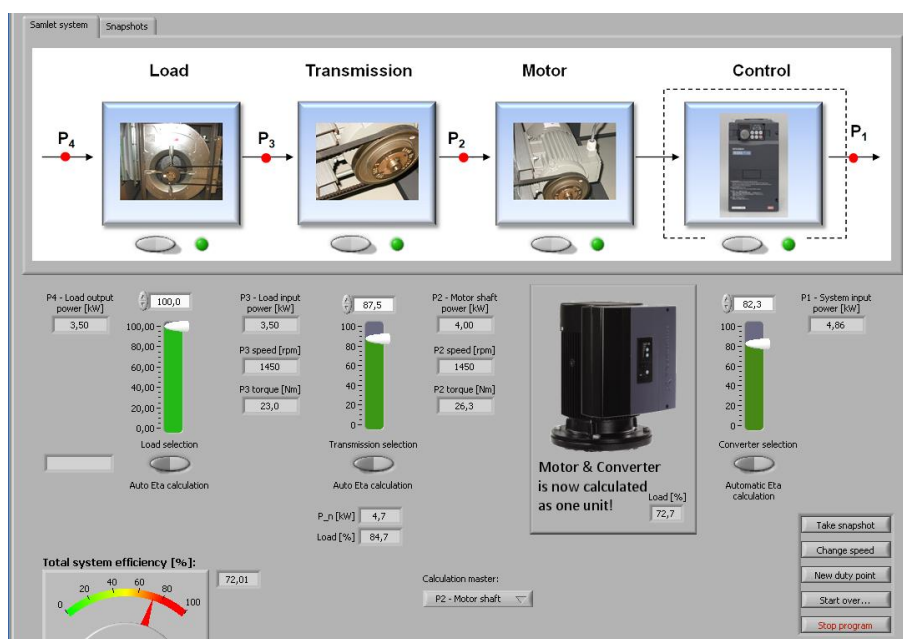


Værktøj til brug ved systemoptimering

PSO-projekt nr. 341-014

Projektrapport



Værktøj til brug ved systemoptimering

Forfattere: Sandie B. Nielsen (Teknologisk Institut), Per Tage Jespersen (Teknologisk Institut) og Claus M. Hvenegaard (Teknologisk Institut)

Forord

Denne rapport er den faglige rapportering/dokumentation til forskningsprojektet bevilget under PSO 2009 administreret af Dansk Energi:

341-014 – Værktøj til brug ved systemoptimering

Rapporten beskriver udviklingen af et værktøj, i form af et program, til brug ved systemoptimering. Rapporten beskriver detaljeret udviklingen af de modeller for remtransmissioner, gear samt motor og frekvensomformer, der er kernen i værktøjet

Rapporten indeholder endvidere et detaljeret eksempel på anvendelse af programmet ved optimering af et ventilationssystem.

Udviklingen af værktøjet er sket i tæt samarbejde med leverandører af komponenter (garmotorer og frekvensomformere), et elforsyningselskab, et energirådgivningsfirma samt en industrivirksomheder repræsenteret ved:

Danfoss – Jørgen Hansen

Lemvigh-Müller – Henrik Lykke Lilleholt

Lokal Energi – Michael Olsen og Ole Ernst Wandall-Frostholm

Energirådgiveren - Jens Erik Pedersen

Arla – Lars Hermann

Arbejdet har været udført i perioden april 2009 – december 2010. Ovennævnte personer har deltaget i kvartalsvise styregruppemøder.

Rapporten er primært udført af Teknologisk Institut i form af:

Sandie B. Nielsen, Industri & Energi

Per Tage Jespersen, Industri & Energi

Claus Martin Hvenegaard, Industri & Energi

Arbejdet er hovedsagligt finansieret af ELFORSK. Den resterende finansiering er kommet ved hjælp af egenfinansiering fra henholdsvis leverandører og industrivirksomheder.

Arbejdet har været suppleret med en række præsentationer. Seminaret ”Få fuldt udbytte af ELFORSK værktøjerne!” hos Byggecentrum i Middelfart og roadshows på Lemvigh Müllers lokationer, er to eksempler på udadvendt aktivitet fra projektgruppens side.

Værktøjet er endvidere blevet testet af et stort antal energirådgivere.

Projektresultatet forventes at blive præsenteret i forskellige fagblade, som f.eks. HVAC magasinet og Drift Vedligehold & Økonomi.

I 2011 præsenteres værktøjet på EEMODS 2011 i Washington.

Sandie B. Nielsen

Teknologisk Institut

December 2010

Indholdsfortegnelse

Side

1	Indledning.....	5
1.1	Opbygning af rapport	5
2	Modeller for remtransmissioner	7
2.1	Virkningsgrad som funktion af belastningsgrad, $\eta_{(\text{belast})}$	7
2.1.1	Kilerem.....	8
2.1.2	Poly-V rem.....	9
2.1.3	Fladrem	11
2.1.4	Tandremme	12
2.2	Virkningsgrad som funktion af skivediameter, $\eta_{(\text{dia})}$	14
2.2.1	Kilerem.....	15
2.2.2	Poly-V rem.....	16
2.2.3	Fladrem	17
2.2.4	Tandremme	18
2.3	Virkningsgrad som funktion af belastningsgrad og skivediameter	19
3	Modeller for gear	20
3.1	Udvikling af gearmodeller	20
3.1.1	Snekkegear	22
3.1.2	Keglehjulsgear.....	24
3.1.3	Tandhjulsgear.....	25
4	Modeller for motor og frekvensomformer.....	27
4.1	Virkningsgrad som funktion af moment for tre motorstørrelser	27
4.1.1	Måling på 2,2 kW motor og frekvensomformer	27
4.1.2	Måling på 22 kW motor og frekvensomformer	28
4.1.3	Måling på 90 kW motor og frekvensomformer	29
4.2	Udvikling af motormodeller	30
4.2.1	Model ved konstant flux (konstant U/f forhold)	31
4.2.2	Model med Automatisk Energi Optimering.....	33
4.3	Verificering af motormodel.....	35
	Andre kilder	38

1 Indledning

Denne projektrapport beskriver detaljeret udviklingen af de modeller for remtransmissioner, gear samt motor inkl. frekvensomformer, der er kernen i værktøjet ”Systemoptimering Tool”.

Projektet følger op på PSO-projekt 338-009 ”Systemoptimering af elmotordrevne maskinsystemer ved at udvikle et praktisk edb-værktøj, der bl.a. baserer sig på nogen af de resultater der fremkom i det nævnte PSO-projekt.

I PSO-projekt 338-009 blev der bl.a. foretaget detaljerede målinger på forskellige gearmotortyper samt på elmotorer inkl. frekvensomformere i forskellige størrelser. Resultaterne af disse målinger er, i dette projekt, anvendt i forbindelse med udvikling af modeller for gear samt motor inkl. frekvensomformer.

Som afslutning på et udviklingsprojekt gennemført af DEFU og Teknologisk Institut i perioden foråret 1998 til efteråret 2001, blev der udarbejdet en projektrapport kaldet ”Remtræksanalyse under praktiske forhold – inkl. internetværktøj”. I rapporten ses, at der blev foretaget en række detaljerede målinger på forskellige remtyper. Resultaterne af disse målinger er, i dette projekt, anvendt i forbindelse med udviklingen af modeller for remtransmissioner.

Med ”Systemoptimering Tool” er det muligt, at designe et energieffektivt system, hvor enkeltkomponenterne hver især er energieffektive, og hvor de er tilpasset hinanden i forhold til behovet. Dette betyder besparelser på virksomhedens elregning og er med til at nedbringe CO₂ udslippet til gavn for miljøet. Meget ofte vil det optimale system reducere omkostningerne til drift og vedligehold.

Projektgruppen håber, at ”Systemoptimering Tool” vil være et nyttigt værktøj i dagligdagen, så det bliver lettere at bringe energieffektive maskinsystemer ind i danske virksomheder.

1.1 Opbygning af rapport

Bogen er opbygget i 4 sektioner:

- Kapitel 2, modeller for remtransmissioner
- Kapitel 3, modeller for gear
- Kapitel 4, modeller for motor og frekvensomformer
- Kapitel 5, eksempel på anvendelse af værktøj

Kapitel 2 viser udvikling af modeller for tre forskellige remtyper. Udviklingen af modellerne tager udgangspunkt i måleresultaterne i DEFU rapport 462 ”Remtræksanalyse under praktiske forhold – inkl. internetværktøj”. I rapporten ses kurver for virkningsgrader som funktion af belastningsgraden for forskellige remtyper. Ud fra disse kurver er der udarbejdet regressionsudtryk der viser sammenhængen mellem virkningsgrader og belastningsgrader.

Kurverne for virkningsgrader som funktion af belastningsgraden gælder for remskiver med diametre på 250 mm. Da virkningsgraden for en rem bl.a. afhænger af remskivens diameter, ses der i DEFU rapport 462 også kurver for virkningsgraden som funktion af skivediametrene. Ud fra disse kurver er der udarbejdet regressionsudtryk der viser sammenhængen mellem virkningsgrader og skivediametre.

I værktøjet ”Systemoptimering Tool” er der foretaget en kombination af udtrykkene, så der både tages hensyn til belastningsgraden og skivediameteren.

Kapitel 3 viser udvikling af modeller for tre forskellige gear typer. Udviklingen af modellerne tager udgangspunkt i måleresultaterne i PSO-projekt 338-009 ”Systemoptimering af elmotordrevne maskinsystemer. I projektet blev der foretaget målinger på tre forskellige gear typer (snekkegear, keglehjulsgear og tandhjulsgear) ved forskellige momenter og omdrejningstal. Der er udviklet modeller for gearenes tab som funktion af moment, omdrejningstal, nominal afgivet effekt (på gearakslen) og nominal optaget effekt for elmotoren.

Kapitel 4 viser udvikling af modeller for motor inkl. frekvensomformer. Udviklingen af modellerne tager udgangspunkt i Ph.D. rapporten ”Energy Optimal Control of Induction Motor Drives” (Aalborg Universitet, Institut for Energiteknologi, Flemming Abrahamsen, 2000), som omhandler energioptimal styring af små og mellemstore asynkronmotordrev med variabel hastighed. I forbindelse med dette projekt blev der foretaget målinger på forskellige størrelser motorer inkl. frekvensomformer ved forskellige styringsstrategier.

Der er udviklet modeller for motorens og frekvensomformerens tab som funktion af moment, omdrejningstal, nominal afgivet effekt og nominal optaget effekt.

Modellerne er verificeret vha. måleresultaterne i PSO-projekt 338-009 ”Systemoptimering af elmotordrevne maskinsystemer. I projektet blev der foretaget målinger på to forskellige størrelser motorer inkl. frekvensomformer ved forskellige styringsstrategier.

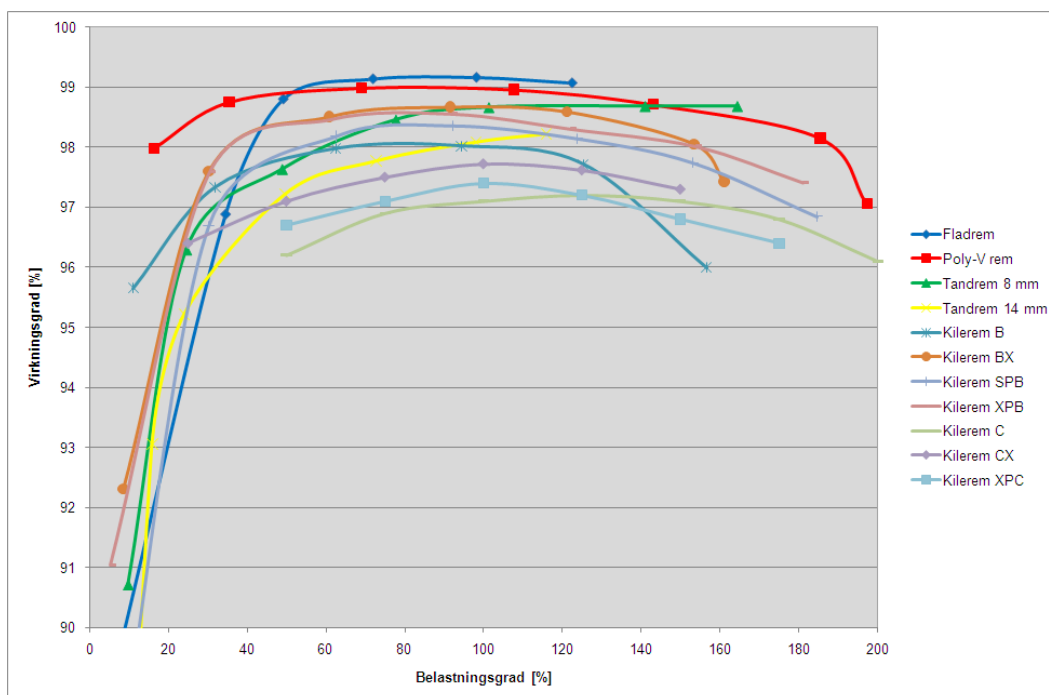
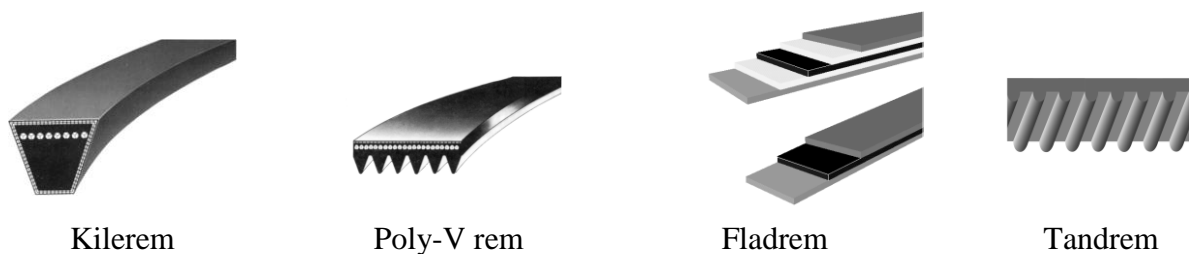
Kapitel 5 viser et eksempel på anvendelse af værktøjet ”Systemoptimering Tool”.

2 Modeller for remtransmissioner

2.1 Virkningsgrad som funktion af belastningsgrad, $\eta_{(\text{belast})}$

Der er udarbejdet matematiske udtryk for virkningsgraden som funktion af belastningsgraden for følgende remtyper:

- Kilerem
- Poly-V rem
- Fladrem
- Tandremme



Figur 2.1. Virkningsgrader som funktion af belastningsgraden for remtyperne fladrem, Poly-V rem, tandrem og kilerem

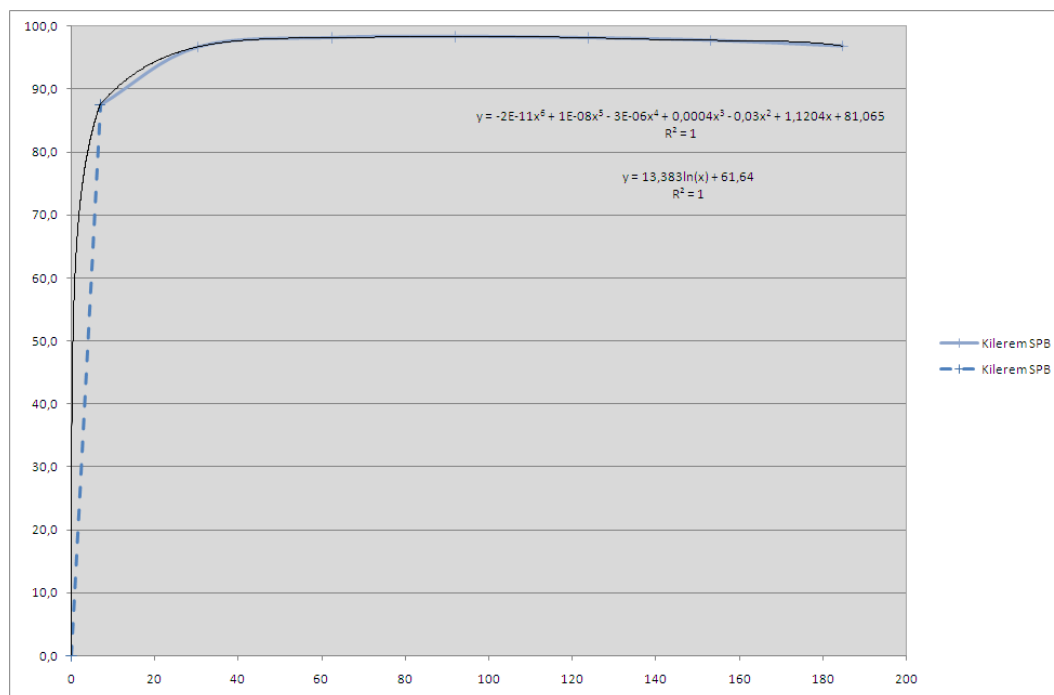
2.1.1 Kilerem

I tabel 2.1 ses målinger af virkningsgrader som funktion af belastningsgrader for en SPB kilerem.

Belastningsgrad [%]	Virkningsgrad [%]
0,01	0,01
6,91	87,50
30,20	96,69
62,53	98,18
92,07	98,36
123,82	98,15
153,20	97,74
184,70	96,85

Tabel 2.1. Virkningsgrad som funktion af belastningsgrad for en SPB kilerem

I figur 2.2 er resultaterne af målingerne indtegnet.



Figur 2.2. Virkningsgrad som funktion af belastningsgrad for en SPB kilerem

Virkningsgraden som funktion af belastningsgraden (x) er opdelt i to udtryk:

$$x \geq 6,91$$

$$\eta_{(\text{belast, 250 mm})} = -2E-11x^6 + 1E-08x^5 - 3E-06x^4 + 0,0004x^3 - 0,03x^2 + 1,1204x + 81,065$$

$$x < 6,91$$

$$\eta_{(\text{belast, 250 mm})} = 13,383\ln(x) + 61,64$$

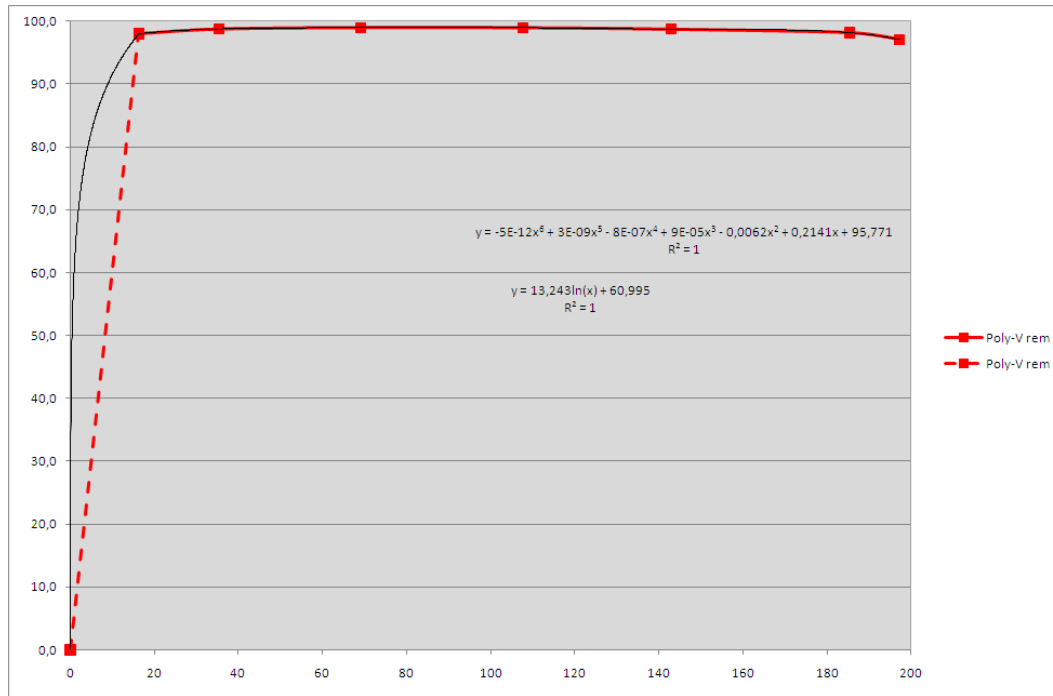
2.1.2 Poly-V rem

I tabel 2.2 ses målinger af virkningsgrader som funktion af belastningsgrader for Poly-V remme.

Belastningsgrad [%]	Virkningsgrad [%]
0,01	0,01
16,33	97,98
35,44	98,75
69,01	98,99
107,66	98,96
142,98	98,71
185,43	98,15
197,29	97,06

Tabel 2.2. Virkningsgrad som funktion af belastningsgrad for Poly-V remme

I figur 2.3 er resultaterne af målingerne indtegnet.



Figur 2.3. Virkningsgrad som funktion af belastningsgrad for Poly-V rem

Virkningsgraden som funktion af belastningsgraden (x) er opdelt i to udtryk:

$$x \geq 16,33$$

$$\eta_{(\text{belast, 250 mm})} = -5E-12x^6 + 3E-09x^5 - 8E-07x^4 + 9E-05x^3 - 0,0062x^2 + 0,2141x + 95,771$$

$$x < 16,33$$

$$\eta_{(\text{belast, 250 mm})} = 13,243\ln(x) + 60,995$$

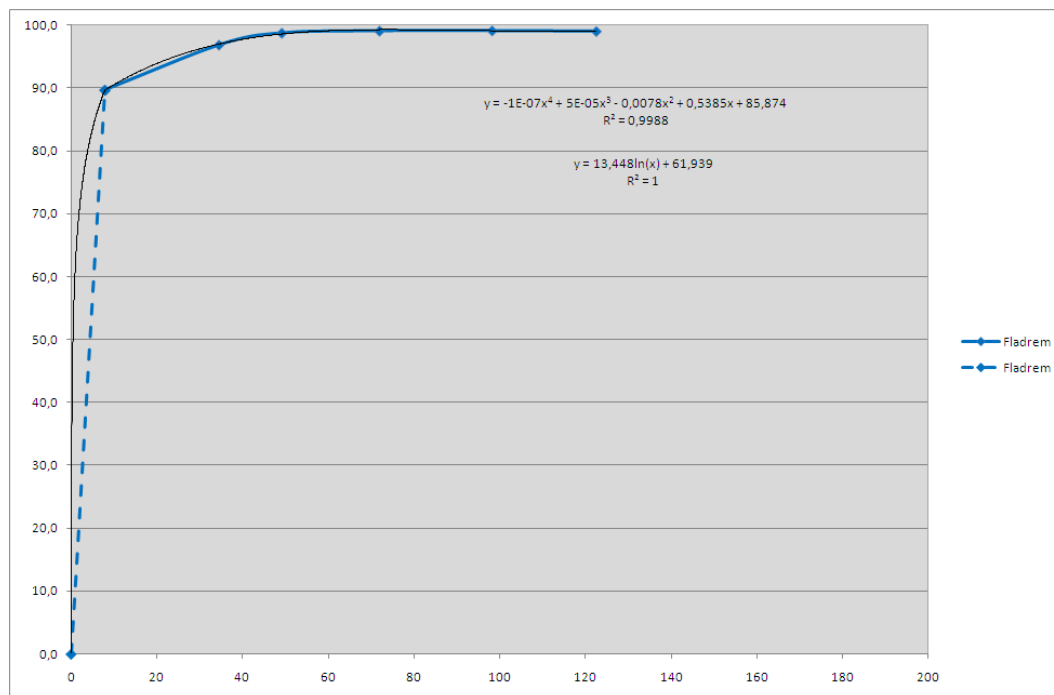
2.1.3 Fladrem

På Teknologisk Instituts momentprøvestand er der foretaget målinger af virkningsgrad som funktion af belastningsgrad for fladremme. Målingerne er foretaget med skivediametre på 250 mm (gælder også for målingerne på Poly-V remme og kileremme). Resultaterne af målingerne ses i tabel 2.3.

Belastningsgrad [%]	Virkningsgrad [%]
0,01	0,01
7,86	89,66
34,55	96,88
49,20	98,80
71,97	99,14
98,23	99,16
122,51	99,07

Tabel 2.3. Virkningsgrad som funktion af belastningsgrad for fladremme

I figur 2.4 er resultaterne af målingerne indtegnet.



Figur 2.4. Virkningsgrad som funktion af belastningsgrad for en fladrem

Virkningsgraden som funktion af belastningsgraden (x) er opdelt i to udtryk:

$$x \geq 7,86$$

$$\eta_{(\text{belast, 250 mm})} = -1\text{E-}07x^4 + 5\text{E-}05x^3 - 0,0078x^2 + 0,5385x + 85,874$$

$$x < 7,86$$

$$\eta_{(\text{belast, 250 mm})} = 13,844\ln(x) + 61,939$$

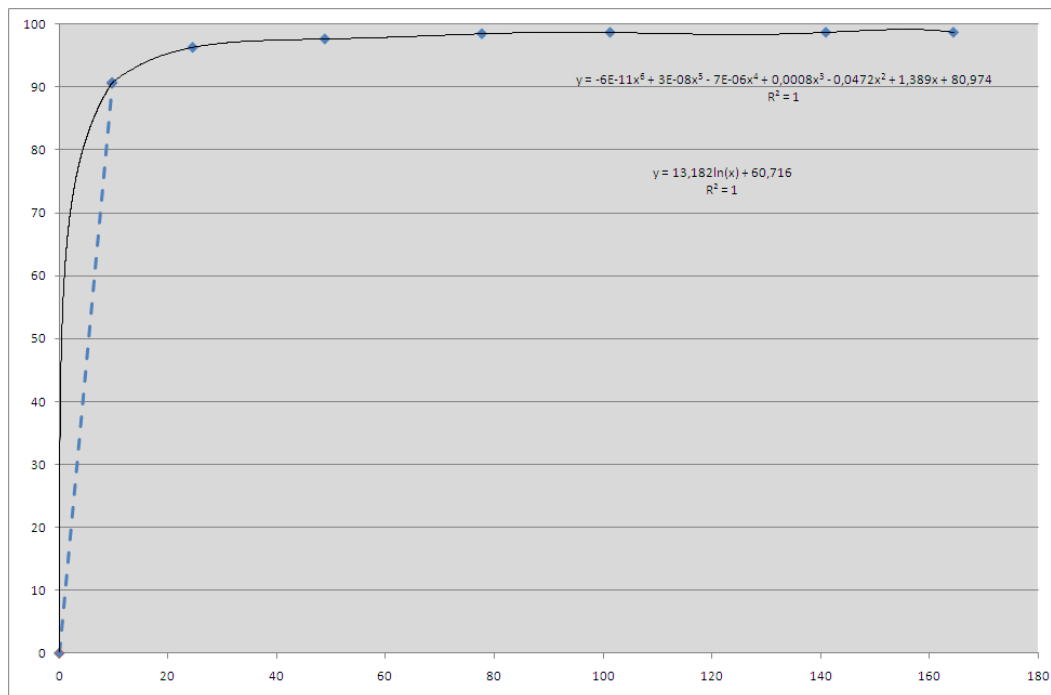
2.1.4 Tandremme

I tabel 2.4 ses målinger af virkningsgrader som funktion af belastningsgrader for en tandrem.

Belastningsgrad [%]	Virkningsgrad [%]
0,01	0,01
9,73	90,71
24,52	96,29
48,85	97,63
77,72	98,45
101,32	98,66
141,01	98,68
164,46	98,68

Tabel 2.4. Virkningsgrad som funktion af belastningsgrad for en tandrem

I figur 2.5 er resultaterne af målingerne indtegnet.



Figur 2.5. Virkningsgrad som funktion af belastningsgrad for en tandrem

Virkningsgraden som funktion af belastningsgraden (x) er opdelt i to udtryk:

$$x \geq 9,73$$

$$\eta_{(\text{belast, 250 mm})} = -6E-11x^6 + 3E-08x^5 - 7E-06x^4 + 0,0008x^3 - 0,0472x^2 + 1,389x + 80,974$$

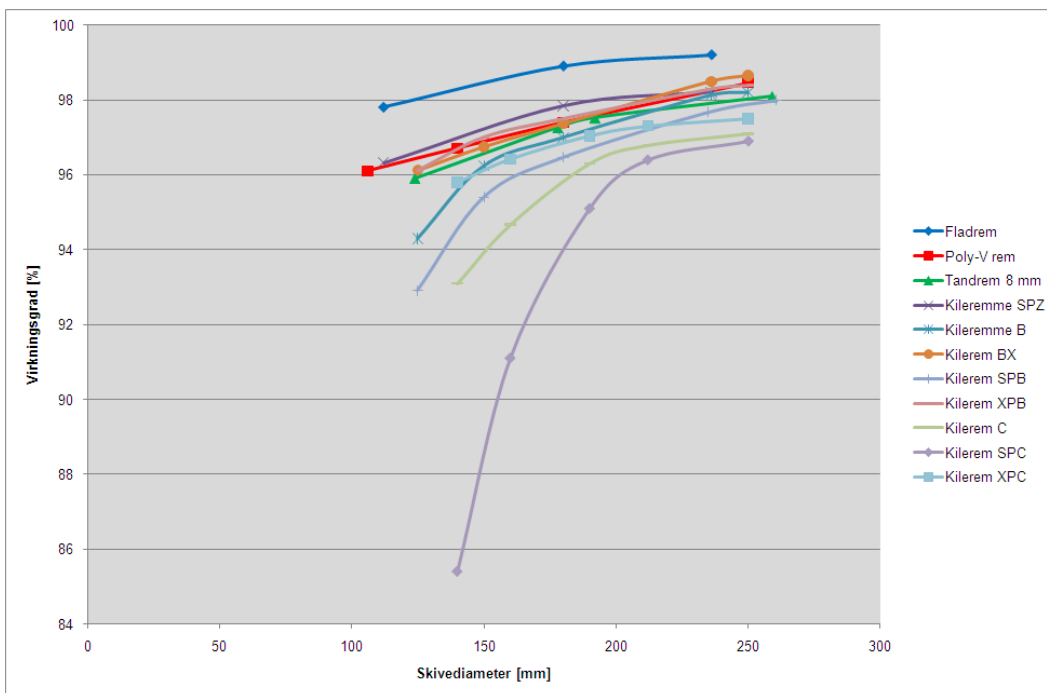
$$x < 9,73$$

$$\eta_{(\text{belast, 250 mm})} = 13,182\ln(x) + 60,716$$

2.2 Virkningsgrad som funktion af skivediameter, $\eta_{(\text{dia})}$

Der er udarbejdet matematiske udtryk for virkningsgraden som funktion af skivediameteren for følgende remtyper:

- Kilerem
- Poly-V rem
- Fladrem
- Tandrem



Figur 2.6. Virkningsgrader som funktion af skivediameter for remtyperne fladrem, Poly-V rem, tandrem og kilerem

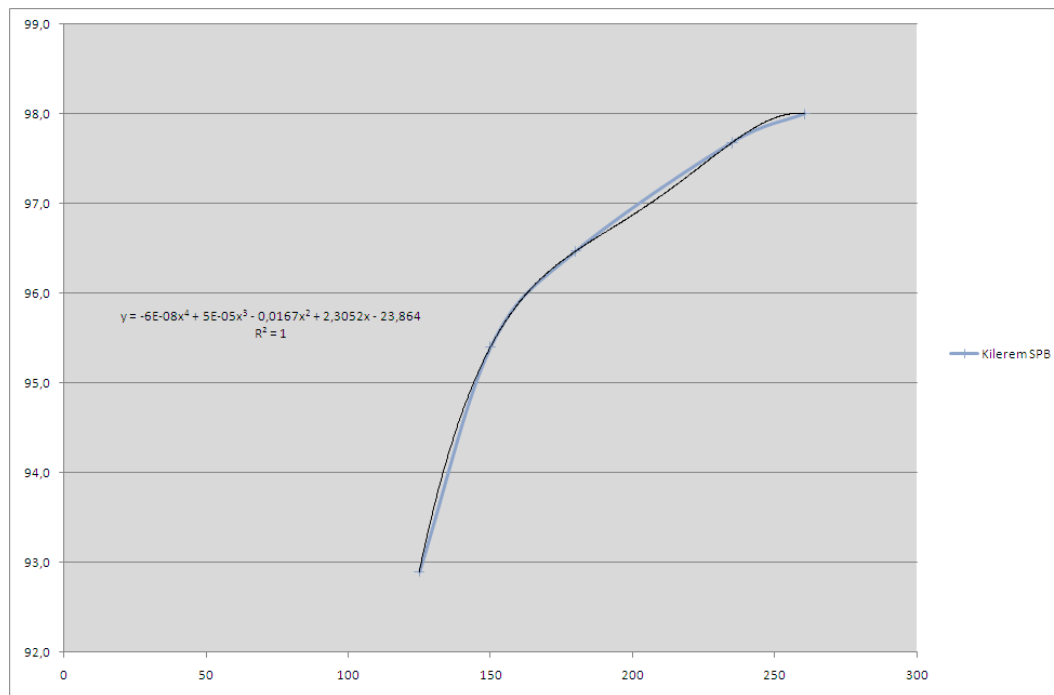
2.2.1 Kilerem

I tabel 2.5 ses målinger af virkningsgrader som funktion af skivediametre for en SPB kilerem.

Belastningsgrad [%]	Virkningsgrad [%]
125	92,9
150	95,4
180	96,5
235	97,7
260,6	98,0

Tabel 2.5. Virkningsgrad som funktion af skivediameter for en SPB kilerem

I figur 2.7 er resultaterne af målingerne indtegnet.



Figur 2.7. Virkningsgrad som funktion af skivediametre for SPB kilerem

Virkningsgraden som funktion af skivediameteren (x) kan udtrykkes således:

$$\eta_{(\text{dia})} = -6\text{E-}08x^4 + 5\text{E-}05x^3 - 0,0167x^2 + 2,3052x - 23,864$$

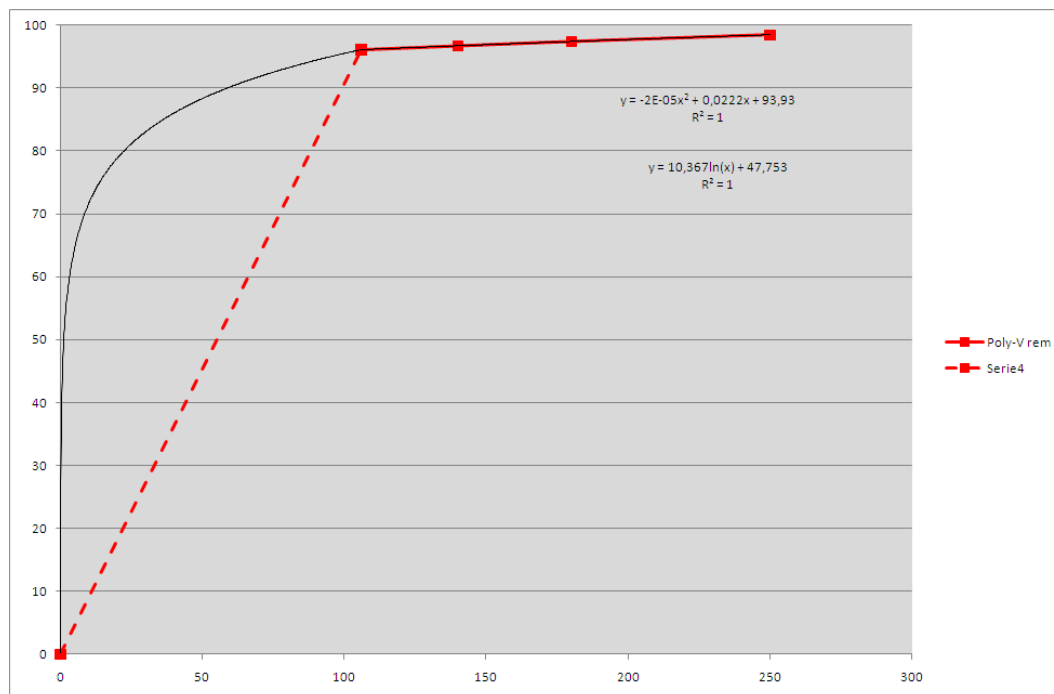
2.2.2 Poly-V rem

I tabel 2.6 ses målinger af virkningsgrader som funktion af skivediametre for Poly-V rem.

Belastningsgrad [%]	Virkningsgrad [%]
0,01	0,01
106	96,1
140	96,71
180	97,4
250	98,46

Tabel 2.6. Virkningsgrad som funktion af skivediametre for Poly-V rem

I figur 2.8 er resultaterne af målingerne indtegnet.



Figur 2.8. Virkningsgrad som funktion af skivediametre for Poly-V rem

Virkningsgraden som funktion af skivediameteren (x) er opdelt i to udtryk:

$$x \geq 106$$

$$\eta_{(\text{dia})} = -2E-05x^2 + 0,0222x + 93,93$$

$$x < 106$$

$$\eta_{(\text{dia})} = 10,367\ln(x) + 47,753$$

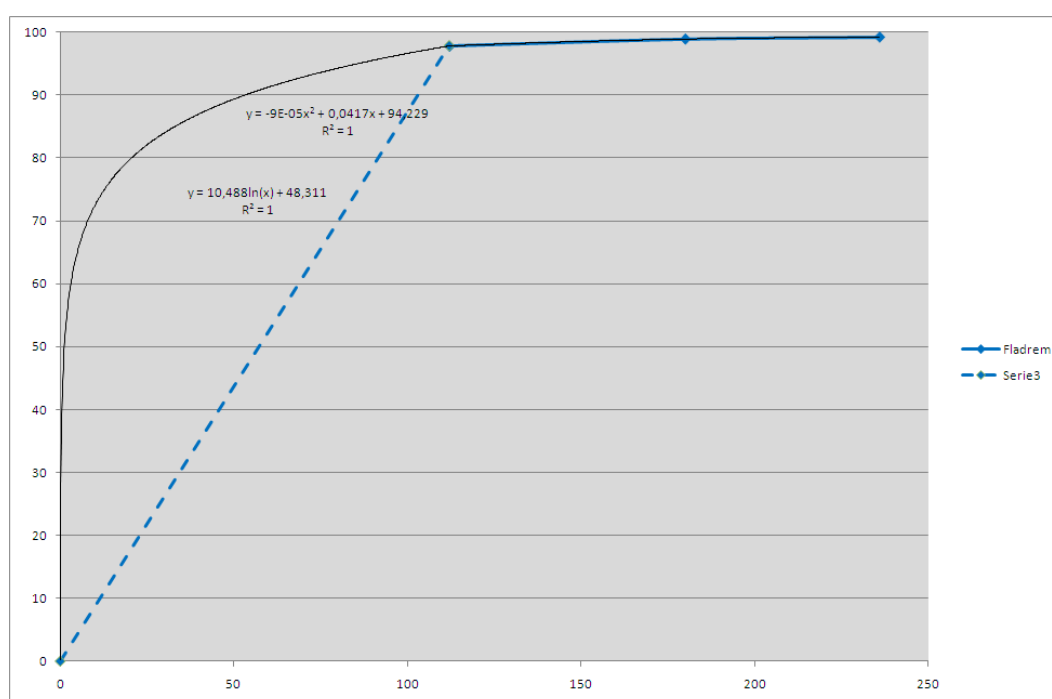
2.2.3 Fladrem

I tabel 2.7 ses målinger af virkningsgrader som funktion af skivediametre for fladremme.

Belastningsgrad [%]	Virkningsgrad [%]
0,01	0,01
112	97,8
180	98,9
236	99,2

Tabel 2.7. Virkningsgrad som funktion af skivediametre for fladremme

I figur 2.9 er resultaterne af målingerne indtegnet.



Figur 2.9. Virkningsgrad som funktion af skivediametre for fladrem

Virkningsgraden som funktion af skivediameteren (x) er opdelt i to udtryk:

$$x \geq 112$$

$$\eta_{(\text{dia})} = -9\text{E-}05x^2 + 0,0417x + 94,229$$

$$x < 112$$

$$\eta_{(\text{dia})} = 10,488\ln(x) + 48,311$$

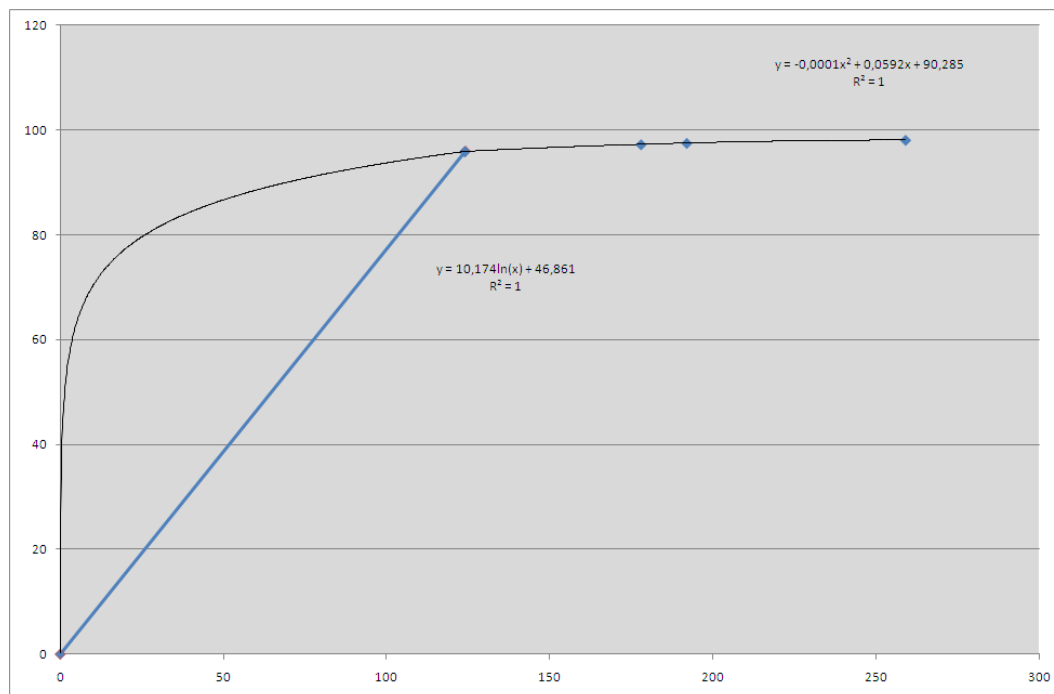
2.2.4 Tandremme

I tabel 2.8 ses målinger af virkningsgrader som funktion af skivediametre for en tandrem.

Belastningsgrad [%]	Virkningsgrad [%]
124	95,9
178	97,26
192	97,52
259	98,09

Tabel 2.8. Virkningsgrad som funktion af skivediameter for en tandrem

I figur 2.10 er resultaterne af målingerne indtegnet.



Figur 2.10. Virkningsgrad som funktion af skivediameter for tandrem

Virkningsgraden som funktion af skivediameteren (x) er opdelt i to udtryk:

$$x \geq 124$$

$$\eta_{(\text{dia})} = -0,0001x^2 + 0,0592x + 90,285$$

$$x < 124$$

$$\eta_{(\text{dia})} = 10,174\ln(x) + 46,861$$

2.3 Virkningsgrad som funktion af belastningsgrad og skivediameter

Virkningsgraden som funktion af belastningsgraden reduceres med en vis procentdel hvis diameteren afviger fra de 250 mm.

Reduktionen findes således:

$$\text{Reduktion} = \frac{\eta_{(250\text{mm})} - \eta_{(\text{dia})}}{\eta_{(250\text{mm})}}$$

Virkningsgraden som funktion af belastningsgraden ved den vilkårlig diameter bliver da:

$$\eta = \eta_{(\text{belast, 250 mm})} \cdot (1 - \text{Reduktion})$$

Eksempel

En kilerem er belastet med 10 % og skivediameteren er 125 mm.

Først beregnes virkningsgraden ved en belastningsgrad på 10 % og for en skivediameter på 250 mm. Belastningsgraden kan, vha. udtrykket i afsnit 1.3, beregnes til:

$$\eta_{(\text{belast, 250 mm})} = 89,7 \%$$

Herefter beregnes reduktionen, da skivediameteren er 125 mm. Udtrykket i afsnit 2.3 benyttes.

$$\text{Reduktion} = \frac{97,95 - 92,9}{97,95} = 0,052$$

Den aktuelle virkningsgrad er da:

$$\eta = 89,7 \cdot (1 - 0,052) = 85,0 \%$$

3 Modeller for gear

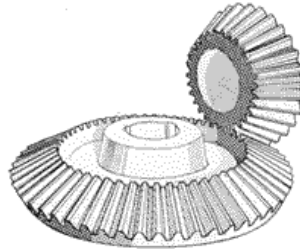
3.1 Udvikling af gearmodeller

Der er udarbejdet matematiske udtryk for tabet som funktion af en række parametre for følgende gearmotor typer:

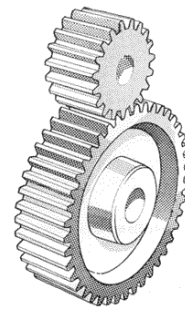
- Snekkegear
- Keglehjulsgear
- Tandhjulsgear



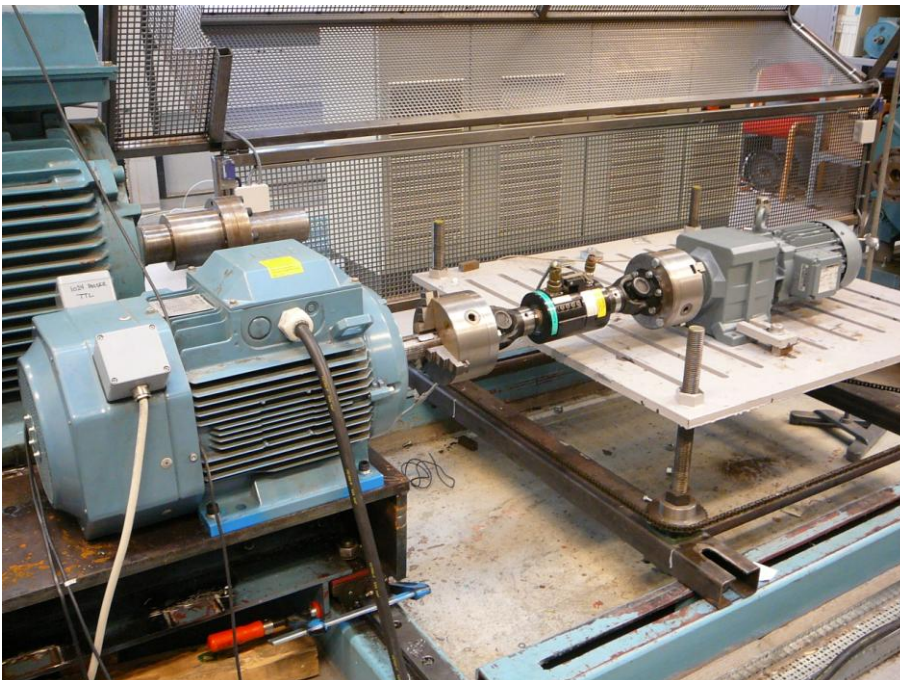
Snekkegear



Keglehjulsgear



Tandhjulsgear



Figur 3.1. Måleopstilling med tandhjulsgear på momentbænk.

I et Excel regneark er der indtastet samhørende værdier for:

- Nominelt moment (M_{nom})
- Aktuelt moment (M_{aktuel})
- Nominelt omdrejningstal (n_{nom})
- Aktuelt omdrejningstal (n_{aktuel})
- Nominel mekanisk effekt/aksel effekt ($P_{2, nom}$)
- Nominelt effektoptag ($P_{1, nom}$)

Herefter er der foretaget beregninger af tre led:

- X1: ($P_{1, nom} - P_{2, nom}$)
- X2: ($(n_{aktuel}/n_{nom})^2 \cdot (P_{1, nom} - P_{2, nom})$)
- X3: ($(M_{aktuel}/M_{nom})^2 \cdot (P_{1, nom} - P_{2, nom})$)

Mnom	M	nnom	n	Pmek non	P1 nom	P1	P2	X1	X2	X3	Tab	Tab beregn
138	177,5668	83	99,4091	1.20	2.00	2902,9	1848,488	0,80	1,316233	1,140416	1,05	0,8129537
138	138,3177	83	102,8064	1.20	2.00	2174,75	1489,109	0,80	0,798664	1,219696	0,69	0,6057362
138	105,854	83	105,1886	1.20	2.00	1654,83	1166,016	0,80	0,467761	1,276874	0,49	0,4746364
138	69,50886	83	107,3904	1.20	2.00	1122,685	781,6893	0,80	0,201692	1,330889	0,34	0,3709365
138	35,70012	83	109,0425	1.20	2.00	663,895	407,6563	0,80	0,053204	1,372153	0,26	0,3154332
138	174,8734	83	82,71716	1.20	2.00	2228,35	1514,775	0,80	1,276605	0,789591	0,71	0,7210365
138	139,0816	83	84,08956	1.20	2.00	1763,465	1224,73	0,80	0,807511	0,816009	0,54	0,5235444
138	104,7648	83	85,35171	1.20	2.00	1346,05	936,3885	0,80	0,458183	0,840689	0,41	0,3775416
138	69,82791	83	86,49118	1.20	2.00	949,595	632,4548	0,80	0,203548	0,863286	0,32	0,2720975
138	31,40337	83	87,58112	1.20	2.00	540,98	288,0151	0,80	0,041168	0,885181	0,25	0,2064513
138	175,8864	83	60,61142	1.20	2.00	1758,5	1116,389	0,80	1,291438	0,423955	0,64	0,6495453
138	140,0243	83	62,00747	1.20	2.00	1380,53	909,2349	0,80	0,818495	0,44371	0,47	0,4489663
138	105,5212	83	63,23953	1.20	2.00	1050,51	698,8063	0,80	0,464824	0,461518	0,35	0,2996183
138	70,89097	83	64,36597	1.20	2.00	740,82	477,8326	0,80	0,209793	0,478105	0,26	0,1927226
138	31,61988	83	65,43271	1.20	2.00	423,65	216,6625	0,80	0,041738	0,494084	0,21	0,1233583
138	175,831	83	37,70782	1.20	2.00	1291,935	694,3132	0,80	1,290624	0,164087	0,60	0,5938169
138	141,4214	83	39,45018	1.20	2.00	996,66	584,2418	0,80	0,834909	0,179601	0,41	0,3997941
138	106,341	83	40,95371	1.20	2.00	750,955	456,0606	0,80	0,472074	0,193552	0,29	0,2456565
138	69,57084	83	42,26766	1.20	2.00	514,895	307,9385	0,80	0,202052	0,206171	0,21	0,1314237
138	33,32627	83	43,29568	1.20	2.00	317,225	151,0984	0,80	0,046364	0,216322	0,17	0,0661725

Figur 3.2. Indtastede og beregnede data for snekkegear og motor i Excel regneark

I regnearket er der foretaget en regressionsanalyse med tabet for motor og frekvensomformer som afhængig variabel (Y) og værdierne for disse tre led som uafhængige variable (X2 og X3).

3.1.1 Snekkegear

RESUMEOUTPUT								
Regressionsstatistik								
Multipel F	0,987701							
R-kvadreret	0,975553							
Justeret R	0,960918							
Standardf	0,07113							
Observati	72							
ANOVA								
	<i>fg</i>	<i>SK</i>	<i>MK</i>	<i>F</i>	<i>Signifikans F</i>			
Regressio	2	14,13281	7,066407	1396,66	1,53E-56			
Residual	70	0,354165	0,00506					
I alt	72	14,48698						
Koefficientstandardfe, t-stat, P-værdi, Nedre 95%, Øvre 95%, Nedre 95,0%, Øvre 95,0%								
Skæring	0	#I/T	#I/T	#I/T	#I/T	#I/T	#I/T	#I/T
X-variabel	0,433009	0,014752	29,35224	4,47E-41	0,403586	0,462431	0,403586	0,462431
X-variabel	0,213092	0,013522	15,75941	1,01E-24	0,186124	0,24006	0,186124	0,24006

Figur 3.3. Resumeoutput fra regressionsanalyse

Udtryk for tab fra gear og motor:

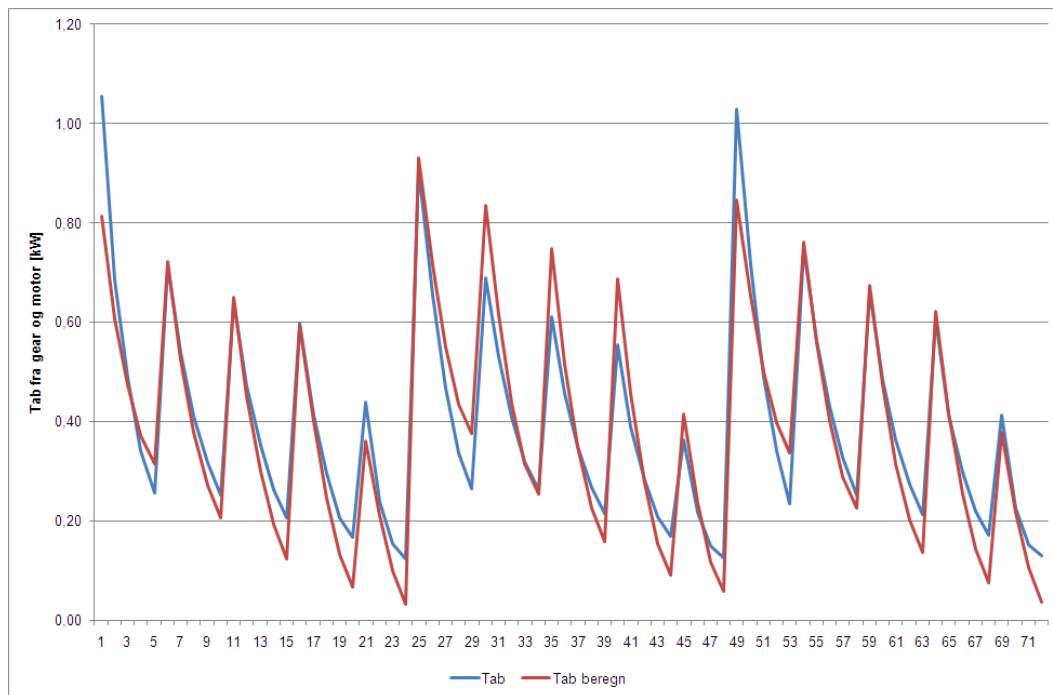
$$P_{tab} = 0,433 \cdot \left(\frac{n_{aktuel}}{n_{nom}} \right)^2 \cdot (P_{1,nom} - P_{2,nom}) + 0,213 \cdot \left(\frac{M_{aktuel}}{M_{nom}} \right)^2 \cdot (P_{1,nom} - P_{2,nom})$$

Som det ses er udtrykket for tab for gear og motor særdeles signifikant.

Korrelationskoefficienten (R-kvadreret) er beregnet til ca. 0,98. Denne værdi skal være så tæt på 1 som muligt.

Signifikansen (Signifikans F) er beregnet til $1,53 \cdot 10^{-56}$, hvilket betyder at regressionsligningen er særdeles signifikant. Denne værdi skal være så tæt på 0 som muligt. P-værdierne for de enkelte koefficienter skal også være så tætte på nul muligt. Som det ses er dette også tilfældet.

I figur 3.4 ses beregnede målte og beregnede tab fra gear og motor. Det målte tab, benævnt ”Tab” er baseret på målingerne fra PSO projekt 338-009. Det beregnede tab, benævnt ”Tab beregn” er baseret på regressionsudtrykket for gearets og motorens tab. Som det ses er der god overensstemmelse mellem de to beregninger.



Figur 3.4. Målte og beregnede tab fra gear og motor

3.1.2 Keglehjulsgear

RESUMEOUTPUT							
Regressionsstatistik							
Multipel F	0,984727						
R-kvadreret	0,969686						
Justeret R	0,954968						
Standardf	0,08122						
Observati	72						
ANAVA							
	fg	SK	MK	F	Signifikans F		
Regressio	2	14,77145	7,385725	1119,6	2,55E-53		
Residual	70	0,461773	0,006597				
I alt	72	15,23322					
Koefficientstandardfe, t-stat, P-værdi, Nedre 95%, Øvre 95%, Nedre 95,0%, Øvre 95,0%							
Skæring	0	#I/T	#I/T	#I/T	#I/T	#I/T	#I/T
X-variabel	0,575955	0,021974	26,21078	6,43E-38	0,532129	0,61978	0,532129
X-variabel	0,290601	0,019735	14,72496	3,97E-23	0,251241	0,329962	0,251241

Figur 3.5. Resumeoutput fra regressionsanalyse

Udtryk for tab fra gear og motor:

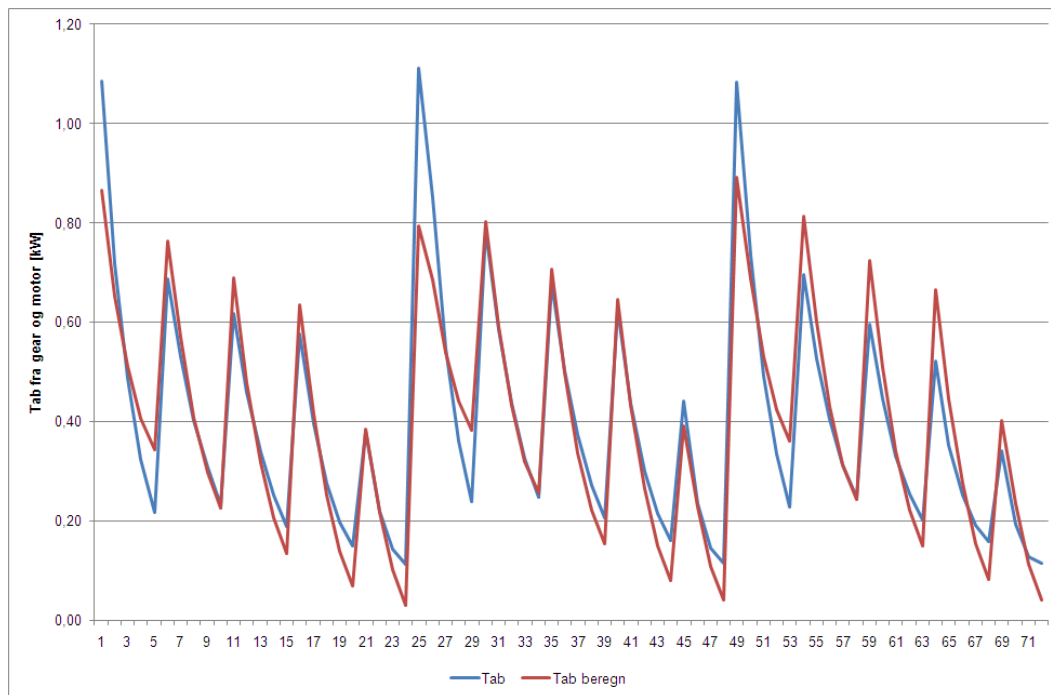
$$P_{tab} = 0,576 \cdot \left(\frac{n_{aktuel}}{n_{nom}} \right)^2 \cdot (P_{1,nom} - P_{2,nom}) + 0,291 \cdot \left(\frac{M_{aktuel}}{M_{nom}} \right)^2 \cdot (P_{1,nom} - P_{2,nom})$$

Som det ses er udtrykket for tab for gear og motor særdeles signifikant.

Korrelationskoefficienten (R-kvadreret) er beregnet til ca. 0,97. Denne værdi skal være så tæt på 1 som muligt.

Signifikansen (Signifikans F) er beregnet til $2,55 \cdot 10^{-53}$, hvilket betyder at regressionsligningen er særdeles signifikant. Denne værdi skal være så tæt på 0 som muligt. P-værdierne for de enkelte koefficienter skal også være så tætte på nul muligt. Som det ses er dette også tilfældet.

I figur 3.6 ses beregnede målte og beregnede tab fra gear og motor. Det målte tab, benævnt ”Tab” er baseret på målingerne fra PSO projekt 338-009. Det beregnede tab, benævnt ”Tab beregn” er baseret på regressionsudtrykket for gearets og motorens tab. Som det ses er der god overensstemmelse mellem de to beregninger.



Figur 3.6. Målte og beregnede tab fra gear og motor

3.1.3 Tandhjulsgear

RESUMEOUTPUT								
Regressionsstatistik								
Multipel F	0,982612							
R-kvadrer	0,965526							
Justeret R	0,950748							
Standardf	0,081826							
Observati	72							
ANOVA								
	fg	SK	MK	F	ignifikans F			
Regressio	2	13,12679	6,563396	980,2657	2,16E-51			
Residual	70	0,468687	0,006696					
I alt	72	13,59548						
Koefficientetandardfe, t-stat, P-værdi, Nedre 95%, Øvre 95%, ledre 95,0%, Øvre 95,0%								
Skæring	0	#I/T	#I/T	#I/T	#I/T	#I/T	#I/T	#I/T
X-variabel	0,746607	0,028746	25,9726	1,15E-37	0,689275	0,803939	0,689275	0,803939
X-variabel	0,333541	0,027027	12,34083	3,11E-19	0,279636	0,387445	0,279636	0,387445

Figur 3.7. Resumeoutput fra regressionsanalyse

Udtryk for tab fra gear og motor:

$$P_{tab} = 0,747 \cdot \left(\frac{n_{aktuel}}{n_{nom}} \right)^2 \cdot (P_{1,nom} - P_{2,nom}) + 0,334 \cdot \left(\frac{M_{aktuel}}{M_{nom}} \right)^2 \cdot (P_{1,nom} - P_{2,nom})$$

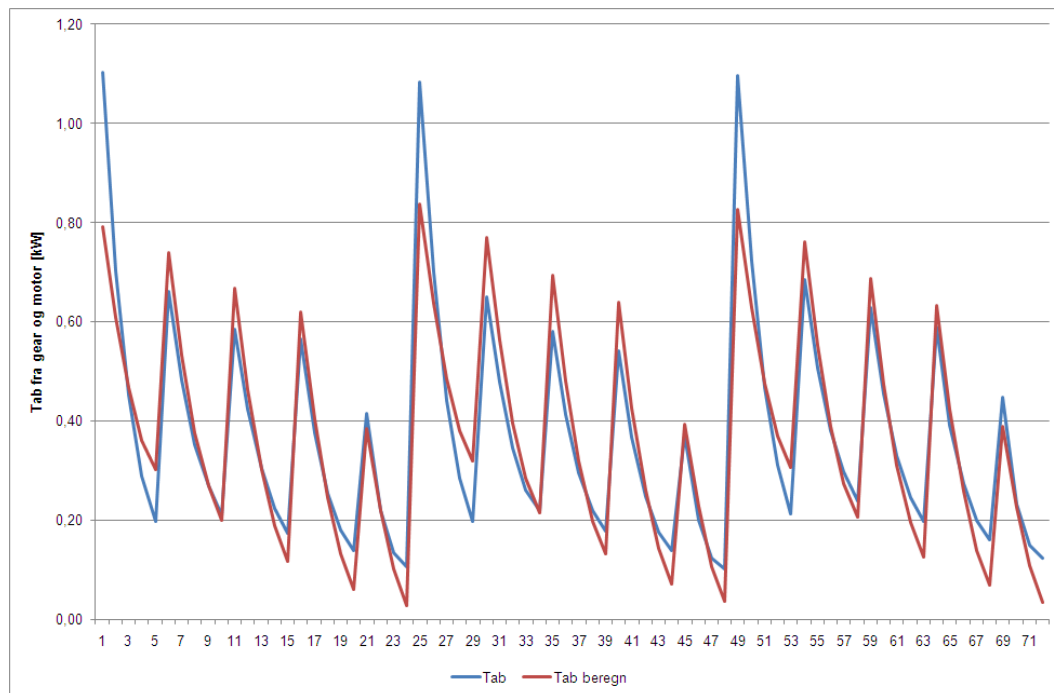
Som det ses er udtrykket for tab for gear og motor særdeles signifikant.

Korrelationskoefficienten (R-kvadreret) er beregnet til ca. 0,97. Denne værdi skal være så tæt på 1 som muligt.

Signifikansen (Signifikans F) er beregnet til $2,16 \cdot 10^{-51}$, hvilket betyder at regressionsligningen er særdeles signifikant. Denne værdi skal være så tæt på 0 som muligt. P-værdierne for de enkelte koefficienter skal også være så tætte på nul muligt. Som det ses er dette også tilfældet.

I figur 3.8 ses beregnede målte og beregnede tab fra gear og motor. Det målte tab, benævnt ”Tab” er baseret på målingerne fra PSO projekt 338-009. Det beregnede tab, benævnt ”Tab beregn” er baseret på regressionsudtrykket for gearets og motorens tab.

Som det ses er der god overensstemmelse mellem de to beregninger.



Figur 3.8. Målte og beregnede tab fra gear og motor

4 Modeller for motor og frekvensomformer

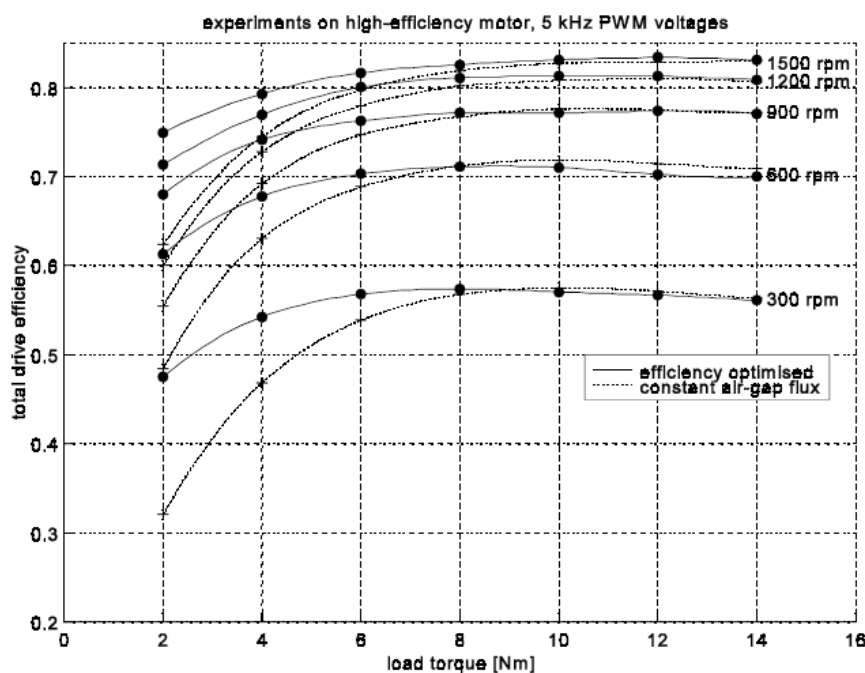
4.1 Virkningsgrad som funktion af moment for tre motorstørrelser

I Ph.D. rapporten ”Energy Optimal Control of Induction Motor Drives” (Aalborg Universitet, Institut for Energiteknologi, Flemming Abrahamsen, 2000), som omhandler energioptimal styring af små og mellemstore asynkronmotordrev med variabel hastighed blev der foretaget målinger på følgende motorer inkl. frekvensomformer:

- 2,2 kW motor og frekvensomformer
- 22 kW motor og frekvensomformer
- 90 kW motor og frekvensomformer

4.1.1 Måling på 2,2 kW motor og frekvensomformer

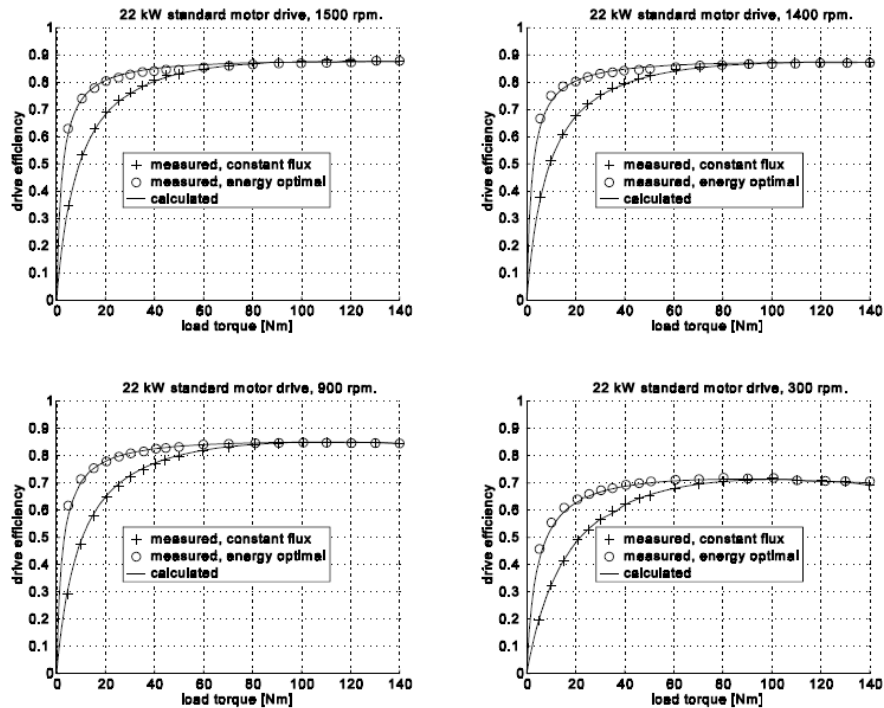
I figur 4.1 ses målinger af virkningsgrader for en 2,2 kW motor og frekvensomformer som funktion af momenter ved konstant flux (konstant U/f forhold) og automatisk energi optimering (f.eks. benævnt AEO).



Figur 4.1. Virkningsgrad for en 2,2 kW motor og frekvensomformer som funktion af moment konstant flux (konstant U/f forhold) og automatisk energi optimering

4.1.2 Måling på 22 kW motor og frekvensomformer

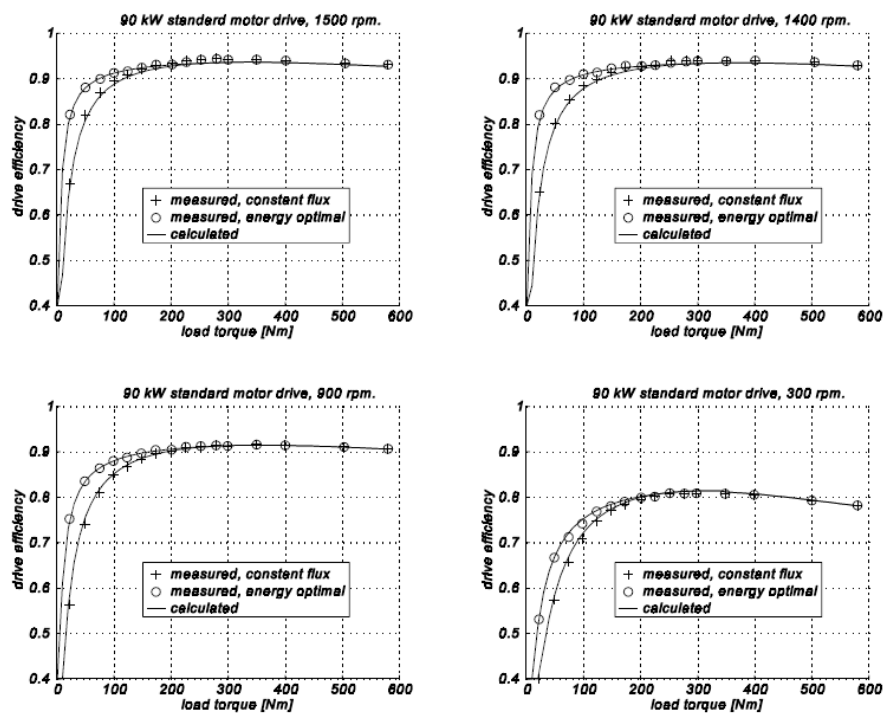
I figur 4.2 ses målinger af virkningsgrader for en 22 kW motor og frekvensomformer som funktion af momenter ved konstant flux (konstant U/f forhold) og automatisk energi optimering (f.eks. benævnt AEO).



Figur 4.2. Virkningsgrad for en 22 kW motor og frekvensomformer som funktion af moment konstant flux (konstant U/f forhold) og automatisk energi optimering

4.1.3 Måling på 90 kW motor og frekvensomformer

I figur 4.3 ses målinger af virkningsgrader for en 90 kW motor og frekvensomformer som funktion af momenter ved konstant flux (konstant U/f forhold) og automatisk energi optimering (f.eks. benævnt AEO).



Figur 4.3. Virkningsgrad for en 90 kW motor og frekvensomformer som funktion af moment konstant flux (konstant U/f forhold) og automatisk energi optimering

4.2 Udvikling af motormodeller

I et Excel regneark er der indtastet samhörrende værdier for:

- Nominelt moment (M_{nom})
- Aktuelt moment (M_{aktuel})
- Nominelt omdrejningstal (n_{nom})
- Aktuelt omdrejningstal (n_{aktuel})
- Nominel mekanisk effekt/aksel effekt ($P_{2, nom}$)
- Nominelt effektoptag ($P_{1, nom}$)
- Totalvirkningsgrad for motor og frekvensomformer (η_{total})

Herefter er der foretaget beregninger af tre led:

- X1: $(P_{1, nom} - P_{2, nom})$
- X2: $((n_{aktuel}/n_{nom})^2) \cdot (P_{1, nom} - P_{2, nom})$
- X3: $((M_{aktuel}/M_{nom})^2) \cdot (P_{1, nom} - P_{2, nom})$

Der er endvidere foretaget beregninger af tabet for motor og frekvensomformer. Dette tab er beregnet således:

$$P_{tab} = P_1 - P_2$$

hvor

$$P_2 = M_{aktuel} \cdot ((\pi \cdot n_{aktuel})/30)$$

$$P_1 = P_2/\eta_{total}$$

Nom moment	Moment	Nom omdr	Omdr	Pmek nom	Pin nom	X1	X2	X3	Bereg1	Bereg2	Total virk al virk beregn	Pmek	Pin	Ptab	
140	5	1500	1500	22	24,11	2,11	2,11	0,002691	1,458597	1,204591	35	39,5	0,785398	2,243995	1,458597
140	10	1500	1500	22	24,11	2,11	2,11	0,010765	1,365272	1,21289	53,5	56,4	1,570796	2,936068	1,365272
140	15	1500	1500	22	24,11	2,11	2,11	0,024222	1,383797	1,226722	63	65,8	2,356194	3,739991	1,383797
140	20	1500	1500	22	24,11	2,11	2,11	0,043061	1,411144	1,246088	69	71,6	3,141593	4,553033	1,411144
140	25	1500	1500	22	24,11	2,11	2,11	0,067283	1,415854	1,270986	73,5	75,5	3,926991	5,342845	1,415854
140	30	1500	1500	22	24,11	2,11	2,11	0,096888	1,488123	1,301417	76	78,4	4,712389	6,200512	1,488123
140	35	1500	1500	22	24,11	2,11	2,11	0,131875	1,505763	1,337382	78,5	80,4	5,497787	7,003551	1,505763
140	40	1500	1500	22	24,11	2,11	2,11	0,172245	1,522014	1,378879	80,5	82,0	6,283185	7,805199	1,522014
140	45	1500	1500	22	24,11	2,11	2,11	0,217997	1,55164	1,425909	82	83,2	7,068583	8,620224	1,55164
140	50	1500	1500	22	24,11	2,11	2,11	0,269133	1,608647	1,478472	83	84,2	7,853982	9,462628	1,608647
140	60	1500	1500	22	24,11	2,11	2,11	0,387551	1,663196	1,600197	85	85,5	9,424778	11,08797	1,663196
140	70	1500	1500	22	24,11	2,11	2,11	0,5275	1,789977	1,744054	86	86,3	10,99557	12,78555	1,789977
140	80	1500	1500	22	24,11	2,11	2,11	0,68898	1,877734	1,910042	87	86,8	12,56637	14,4441	1,877734
140	90	1500	1500	22	24,11	2,11	2,11	0,87199	2,019595	2,098163	87,5	87,1	14,13717	16,15676	2,019595
140	100	1500	1500	22	24,11	2,11	2,11	1,076531	2,141995	2,308415	88	87,2	15,70796	17,84996	2,141995
140	110	1500	1500	22	24,11	2,11	2,11	1,302602	2,356194	2,540799	88	87,2	17,27876	19,63495	2,356194
140	120	1500	1500	22	24,11	2,11	2,11	1,550204	2,570394	2,795315	88	87,1	18,84956	21,41995	2,570394
140	130	1500	1500	22	24,11	2,11	2,11	1,819337	2,784593	3,071963	88	86,9	20,42035	23,20495	2,784593
140	140	1500	1500	22	24,11	2,11	2,11	2,11	2,998793	3,370743	88	86,7	21,99115	24,98994	2,998793
140	5	1500	900	22	24,11	2,11	0,7596	0,002691	1,153723	0,772248	29	37,9	0,471239	1,624962	1,153723

Figur 4.4. Indtastede og beregnede data i Excel regneark

I regnearket er der foretaget en regressionsanalyse med tabet for motor og frekvensomformer som afhængig variabel (Y) og værdierne for disse tre led som uafhængige variable (X1, X2 og X3).

4.2.1 Model ved konstant flux (konstant U/f forhold)

RESUMEOUTPUT							
<i>Regressionsstatistik</i>							
Multipel F	0,991676						
R-kvadreret	0,983421						
Justeret R	0,976668						
Standardf	0,24815						
Observati	156						
<i>ANAVA</i>							
	<i>fg</i>	<i>SK</i>	<i>MK</i>	<i>F</i>	<i>Signifikans F</i>		
Regressio	3	558,8525	186,2842	3025,152	2,9E-135		
Residual	153	9,421503	0,061578				
I alt	156	568,274					
<i>Koefficientetandardfe, t-stat, P-værdi, Nedre 95%, Øvre 95%, Nedre 95,0%, Øvre 95,0%</i>							
Skæring	0	#I/T	#I/T	#I/T	#I/T	#I/T	#I/T
X-variabel	0,249426	0,013267	18,80043	1,31E-41	0,223216	0,275636	0,275636
X-variabel	0,320159	0,018893	16,94629	6,19E-37	0,282835	0,357483	0,357483
X-variabel	1,027923	0,026851	38,28279	2,89E-80	0,974877	1,08097	1,08097

Figur 4.5. Resumeoutput fra regressionsanalyse (konstant flux)

Udtryk for tab fra motor og frekvensomformer:

$$P_{tab} = 0,249 \cdot (P_{1,nom} - P_{2,nom}) + 0,320 \cdot \left(\frac{n_{aktuel}}{n_{nom}} \right)^2 \cdot (P_{1,nom} - P_{2,nom}) + 1,03 \cdot \left(\frac{M_{aktuel}}{M_{nom}} \right)^2 \cdot (P_{1,nom} - P_{2,nom})$$

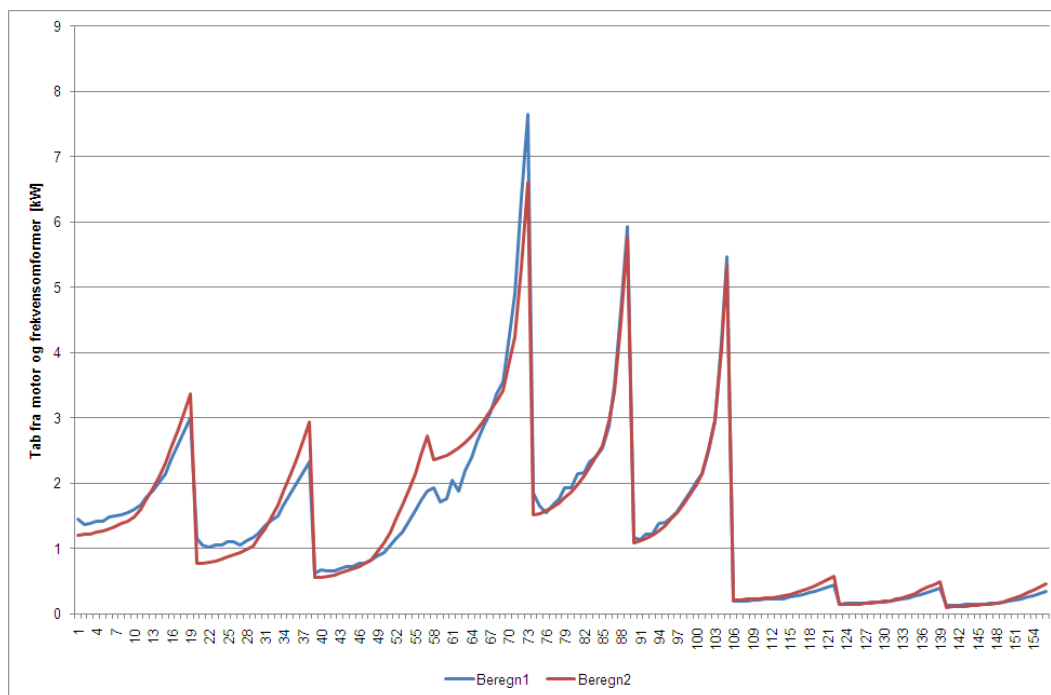
Som det ses er udtrykket for tab for motor og frekvensomformer særdeles signifikant.

Korrelationskoefficienten (R-kvadreret) er beregnet til 0,98. Denne værdi skal være så tæt på 1 som muligt.

Signifikansen (Signifikans F) er beregnet til $2,9 \cdot 10^{-135}$, hvilket betyder at regressionsligningen er særdeles signifikant. Denne værdi skal være så tæt på 0 som muligt. P-værdierne for de enkelte koefficienter skal også være så tætte på nul muligt. Som det ses er dette også tilfældet.

I figur 4.6 ses beregnede tab fra motor og frekvensomformer ved Konstant Flux. Det beregnede tab, benævnt "Beregn1" er baseret på målingerne fra Ph.D. rapporten fra Aalborg Universitet. Det beregnede tab, benævnt "Beregn2" er baseret på regressionsudtrykket for motorens og frekvensomformerens tab.

Som det ses er der god overensstemmelse mellem de to beregninger.



Figur 4.6. Beregnede tab fra motor og frekvensomformer (Konstant Flux)

4.2.2 Model med Automatisk Energi Optimering

RESUMEOUTPUT							
Regressionsstatistik							
Multipel F	0,987476						
R-kvadreret	0,97511						
Justeret R	0,968248						
Standardf	0,290615						
Observati	156						
ANAVA							
	<i>fg</i>	<i>SK</i>	<i>MK</i>	<i>F</i>	<i>Signifikans F</i>		
Regressio	3	506,2306	168,7435	1997,979	7,5E-122		
Residual	153	12,92194	0,084457				
I alt	156	519,1525					
Koefficientstandardfe, t-stat, P-værdi, Nedre 95%, Øvre 95%, Nedre 95,0%, Øvre 95,0%							
Skæring	0	#I/T	#I/T	#I/T	#I/T	#I/T	#I/T
X-variabel	0,169142	0,015537	10,88615	8,51E-21	0,138447	0,199837	0,138447
X-variabel	0,287288	0,022126	12,98442	1,85E-26	0,243577	0,330999	0,243577
X-variabel	1,182079	0,031446	37,59115	3,6E-79	1,119955	1,244203	1,119955

Figur 4.7. Resumeoutput fra regressionsanalyse (AEO)

Udtryk for tab fra motor og frekvensomformer:

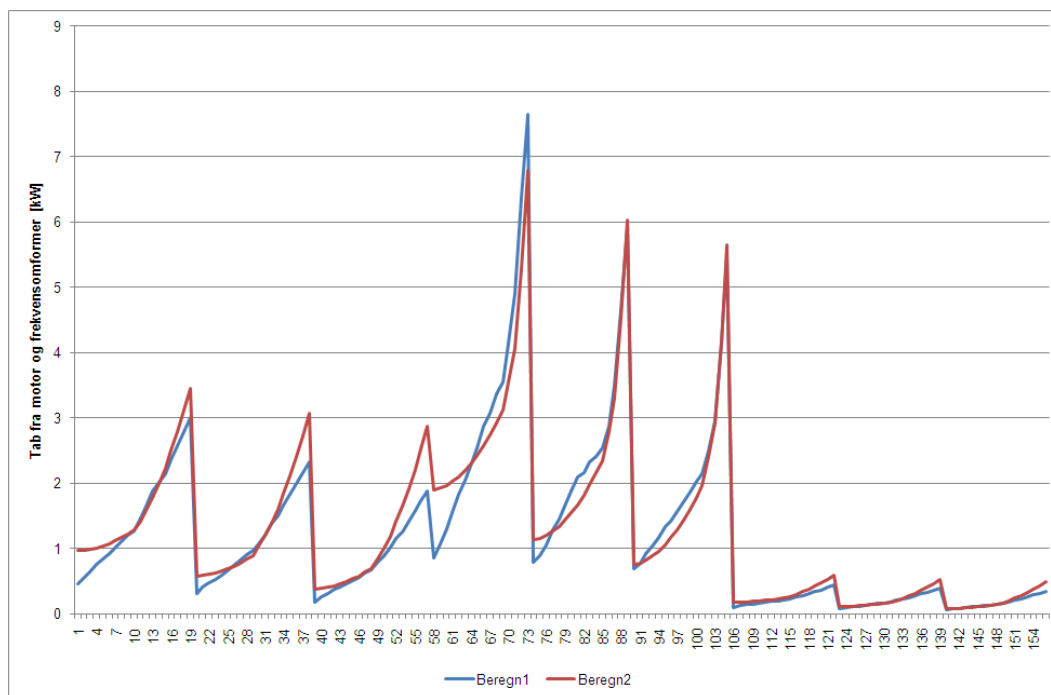
$$P_{tab} = 0,169 \cdot (P_{1,nom} - P_{2,nom}) + 0,287 \cdot \left(\frac{n_{aktuel}}{n_{nom}} \right)^2 \cdot (P_{1,nom} - P_{2,nom}) + 1,18 \cdot \left(\frac{M_{aktuel}}{M_{nom}} \right)^2 \cdot (P_{1,nom} - P_{2,nom})$$

Som det ses er udtrykket for tab for motor og frekvensomformer særdeles signifikant.

Korrelationskoefficienten (R-kvadreret) er beregnet til 0,975. Denne værdi skal være så tæt på 1 som muligt.

Signifikansen (Signifikans F) er beregnet til $7,5 \cdot 10^{-122}$, hvilket betyder at regressionsligningen er særdeles signifikant. Denne værdi skal være så tæt på 0 som muligt. P-værdierne for de enkelte koefficienter skal også være så tætte på nul muligt. Som det ses er dette også tilfældet.

I figur 4.8 ses beregnede tab fra motor og frekvensomformer ved Automatisk Energi Optimering. Det beregnede tab, benævnt "Beregn1" er baseret på målingerne fra Ph.D. rapporten fra Aalborg Universitet. Det beregnede tab, benævnt "Beregn2" er baseret på regressionsudtrykket for motorens og frekvensomformerens tab. Som det ses er der god overensstemmelse mellem de to beregninger.



Figur 4.8. Beregnede tab fra motor og frekvensomformer (Automatisk Energi Optimering)

4.3 Verificering af motormodel

I forbindelse med PSO-projekt nr. 338-009 ”Systemoptimering af elmotordrevne maskinsystemer” blev der foretaget målinger af totalvirkningsgrader som funktion af momenter for en 4 kW og en 55 kW motor.

I figur 4.9 ses målinger og beregninger (angivet med et B) af totalvirkningsgrader som funktion af momenter for 4 kW motoren.

De beregnede virkningsgrader er beregnet således:

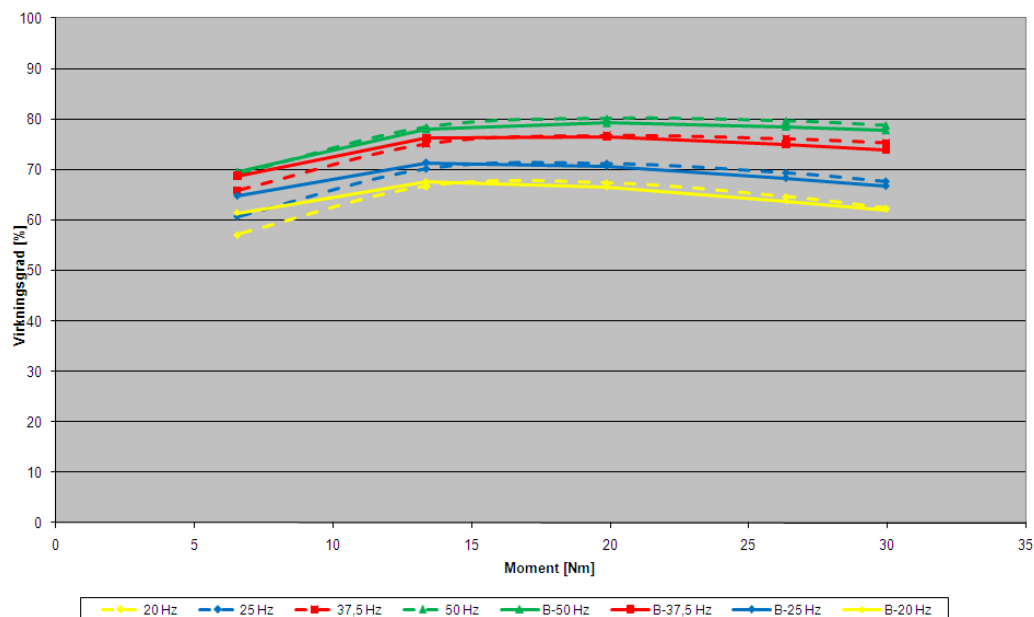
$$\eta_{\text{total}} = P_2 / (P_2 + P_{\text{tab}})$$

hvor

P_2 er motorens akseffekt (den mekaniske effekt)

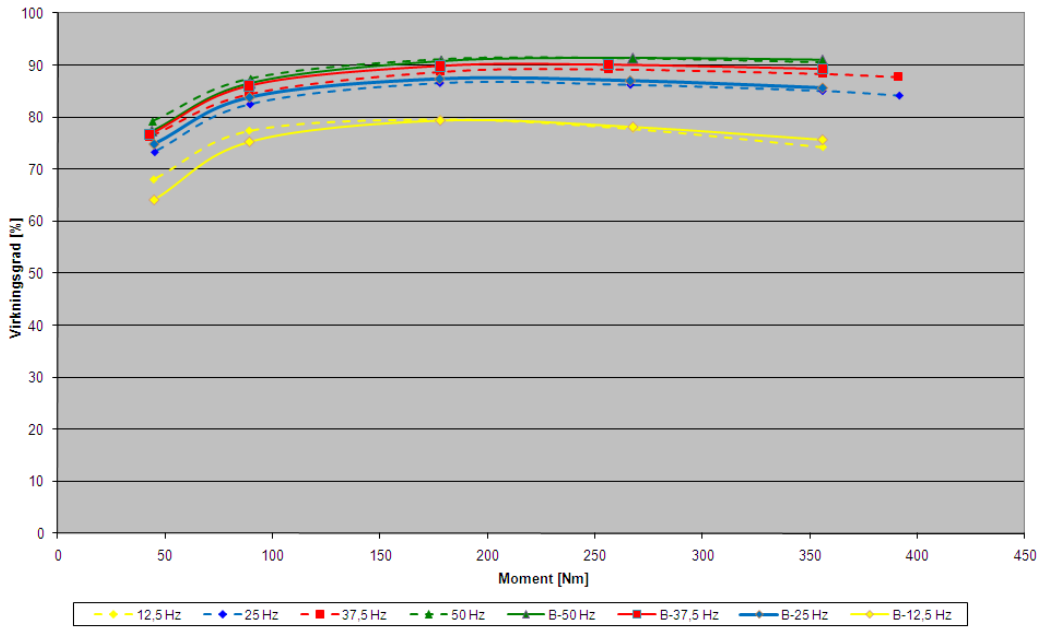
P_{tab} er tabet for motor og frekvensomformer beregnet med modellen (regressionsudtrykket)

Som det ses er der god overensstemmelse mellem de målte virkningsgrader og de beregnede virkningsgrader.



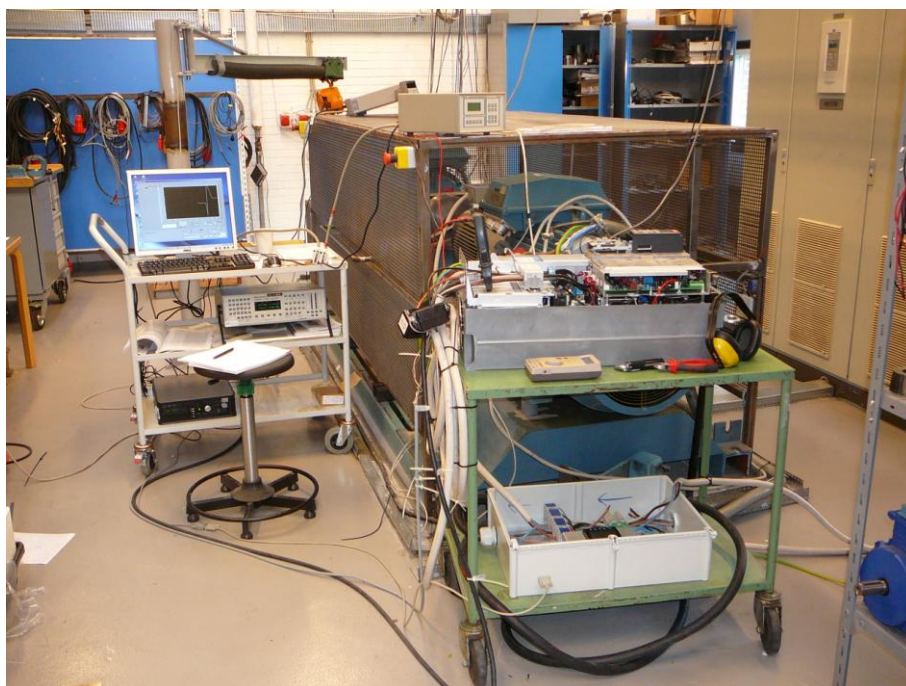
Figur 4.9. Målinger og beregninger (angivet med et B) af totalvirkningsgrader som funktion af momenter for en 4 kW motor

I figur 4.10 ses målinger og beregninger (angivet med et B) af totalvirkningsgrader som funktion af momenter for 55 kW motoren.
Som det ses er der god overensstemmelse mellem de målte virkningsgrader og de beregnede virkningsgrader.



Figur 4.10. Målinger og beregninger (angivet med et B) af totalvirkningsgrader som funktion af momenter for en 55 kW motor

I figur 4.10 og 4.11 ses måleopstillingen ved test af 55 kW motoren inkl. frekvensomformer



Figur 4.10. Måleopstilling



Figur 4.11. 55 kW frekvensomformer

Andre kilder

Andre hjælpeværktøjer - links - kilder

Håndbøger

- /1/ Den lille Blå om systemoptimering. ELFOR. Jørn Borup Jensen (ELFOR), Henrik Lykke Lilleholt (Louis Poulsen Industri & Automation), Claus M. Hvenegaard (Teknologisk Institut) og Hans Andersen (Teknologisk Institut). 2005
ISBN 87-88245-53-5
- /2/ Den store Blå om systemoptimering. ELFOR. Jørn Borup Jensen (ELFOR), Henrik Lykke Lilleholt (Louis Poulsen Industri & Automation), Claus M. Hvenegaard (Teknologisk Institut) og Hans Andersen (Teknologisk Institut). 2005
- /3/ Håndbog i Energirådgivning – Elmotorer, motorstyringer og transmissioner, DEFU, 2000, Hans Henrik Hansen (DEFU), Lars Bjerre (DEFU) og Jens Erik Pedersen (TRE-FOR)

Rapporter, kataloger, vejledninger og standarder

- /4/ Energy Optimal Control of Induction Motor Drives, Aalborg Universitet – Institute of Energy Technology, 2000, Flemming Abrahamsen,
ISBN: 87-89179-26-9
- /5/ Energioptimering ved elmotordrift, Teknisk rapport 322, DEFU, 1991, Anders Rebsdorf (DEFU), Hans Andersen (DEFU), Jørn Borup Jensen (DEFU), Mogens Johansson (Dansk Energi Analyse a/s), Torben Laubst (DIA-E) og Henrik Ørskov Pedersen (DIA-E).
- /6/ Energioptimering ved elmotordrift. Drevanalyse i praksis, Teknisk rapport 380, DEFU, 1997, Hans Andersen (DEFU) og Hans Henrik Hansen (DEFU).
- /7/ Afprøvning af trefasede softstartere og enfasede energispareenheder, Rapport 94.5A, Aalborg Universitet – Institut for Energiteknik, 1995
Frede Blåbjerg, John K. Pedersen og Hans-Henrik Hansen
- /8/ Opslagsværk over remtransmissioners karakteristika og energieffektivitet, TR 430, DEFU 1999. Lars Bjerre (DEFU) og Thomas Perch Nielsen (Teknologisk Institut)
- /9/ Remtræksanalyse under praktiske forhold – inkl. internetværktøj, DEFU rapport 462, DEFU 2001. Hans Andersen (DEFU), Lars Bjerre (DEFU), Jan Christiansen (DEFU) og Thomas Perch Nielsen (Teknologisk Institut)

/9/ Systemoptimering af elmotordrevne maskinsystemer,
PSO-projekt nr. 338-009, Teknologisk Institut 2008. Claus M. Hvenegaard (Teknologisk
Institut), Hans Andersen (Teknologisk Institut), Sandie Brændgaard Nielsen (Teknologisk
Institut) og Mads Peter Rudolph Hansen (Teknologisk Institut)

Hjemmesider

ELFORSK

www.elforsk.dk

Dansk Energi

www.danskenergi.dk

Teknologisk Institut

www.teknologisk.dk

Lokal Energi

www.lokalenergi.dk

Danfoss

www.danfoss.dk

Lemvigh-Müller

www.lemu.dk

Arla

www.arla.dk