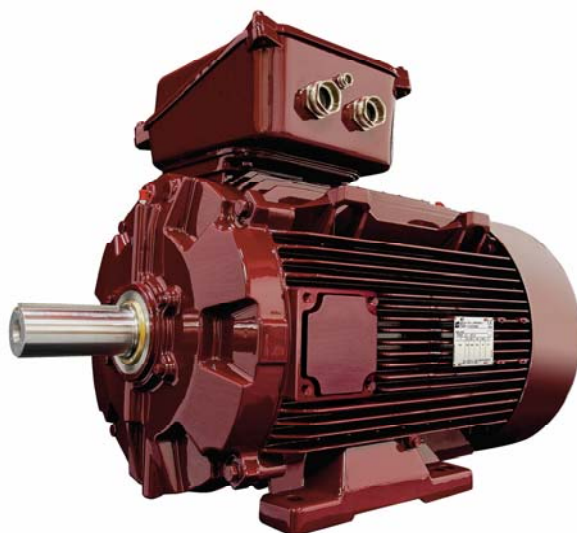


Reduktion af elforbrug til motordrift ved anvendelse af PM motorer

PSO-projekt nr. 340-028

Projektrapport



Reduktion af elforbrug til motordrift ved anvendelse af PM motorer

Forfattere:

Claus M. Hvenegaard (Teknologisk Institut)

Sandie B. Nielsen (Teknologisk Institut)

Mads Peter Rudolph Hansen (Teknologisk Institut)

Christian Grønborg Nikolaisen (Teknologisk Institut)

Ewen Ritchie (Aalborg Universitet)

Krisztina Leban (Aalborg Universitet)

Forord

Denne rapport er den faglige rapportering/dokumentation til forskningsprojektet bevilget under PSO 2008 administreret af Dansk Energi Net:

340-028 – Reduktion af elforbrug til motordrift ved anvendelse af PM motorer

Rapporten indeholder først et afsnit der forklarer og illustrerer de forskellige elmotorers virkemåde og PM motorens særlige egenskaber. Dette afsnit beskriver også state of the art i forbindelse med PM motorer samt pålidelighed af PM motoren.

Rapporten indeholder endvidere et afsnit om målinger af momenter og omdrejningstal på EFF1 og PM motorer (inkl. frekvensomformere) i tre forskellige størrelser på Teknologisk Instituts momentbænk.

Rapporten indeholder et afsnit om målinger på henholdsvis ventilatorer og pumper i to forskellige størrelser. Ventilatorerne og pumperne var forsynet med både EFF1 og PM motorer.

Endelig indeholder rapporten en detaljeret kortlægning af elforbruget til motordrift i industrien, opdelt på brancher, teknologier og delkomponenter samt en opgørelse af besparelespotentialer på dette elforbrug ved udskiftning af eksisterende motorer til PM motorer.

Projektets gennemførelse er sket i tæt samarbejde med et universitet, to motorleverandører, en ventilatorleverandør samt en pumpeleverandør repræsenteret ved:

- Aalborg Universitet – Ewen Ritchie
- Leroy Somer – Jean Sebastian Flammang
- Øland – Niels Schondel
- Desmi – Henrik Mørkholt Sørensen
- Motron – Morten Enggaard Hansen

Arbejdet har været udført i perioden april 2008 – december 2009.

Rapporten er primært udført af Teknologisk Institut i form af:

Claus Martin Hvenegaard, Energi & Klima (projektleder)

Sandie B. Nielsen, Energi & Klima

Mads Peter Rudolph Hansen, Energi & Klima

Christian Grønberg Nikolaisen, Energi & Klima

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

Arbejdet har været suppleret med en række foredrag. EEMODS 2009 i Nantes (september 2009) og Åbent hus/faglig workshop/25 års jubilæum ”El-tekniske optimeringer og energibesparelser i industrien” hos Leroy-Somer Danmark er to eksempler på udadvendt aktivitet fra projektgruppens side. Projektet er endvidere præsenteret i fagbladene HVAC Magasinet og Teknisk Nyt.

Claus M. Hvenegaard
Teknologisk Institut
December 2009

Indholdsfortegnelse

Side

1	Indledning	7
1.1	Opbygning af rapport.....	7
2	Motor teori	9
2.1	Elmotorers virkemåde og PM modellens særlige egenskaber	9
2.1.1	Baggrund og introduktion	9
2.1.2	Mekanisk konstruktion	10
2.1.3	Generel virkemåde for elektriske maskiner	10
2.1.4	Fremkaldelse af et magnetfelt	13
2.1.5	Induktion af et magnetfelt ved at der løber strøm i en spole.....	14
2.1.6	Permanent magnet	14
2.1.7	Hvordan dirigeres magnetfeltet hen, hvor det skal anvendes?	15
2.1.8	Hvordan frembringes en mekanisk effekt?	16
2.2	De forskellige maskintyper.....	18
2.2.1	Asynkronmaskinen	18
2.2.2	DC maskinen	21
2.2.3	Synkronmaskinen	23
2.2.4	Switchede reluktansmaskinen	25
2.2.5	Generel sammenligning af de forskellige motortyper	25
2.3	Typiske applikationer	25
2.3.1	Asynkronmaskinen	25
2.3.2	DC maskinen	26
2.3.3	Synkronmaskinen	26
2.3.4	Switched reluktansmaskinen.....	26
2.4	Effektivitet og tab	27
2.4.1	Asynkronmaskinen	27
2.4.2	DC maskinen	28
2.4.3	Synkronmaskinen	29
2.4.4	Switchede reluktansmaskinen	30
2.5	Holdbarhed og svage punkter	30
2.5.1	Asynkronmaskinen	30
2.5.2	DC maskinen	31
2.5.3	Synkronmaskinen	31
2.5.4	Switchede reluktansmaskinen	32
2.6	Geometrisk udformning og integration med applikationen	32
2.7	Regulerbarhed og nødvendig styringsudrustning	32
2.7.1	Asynkronmaskinen	32
2.7.2	DC maskinen	33
2.7.3	Synkronmaskinen	33
2.7.4	Switchede reluktansmaskinen	33
2.8	Opsummering og konklusion	33
3	Test af motorer i momentbænk	34
3.1	Test af lille asynkronmotor og PM motor	34
3.1.1	Test af 2,2 kW asynkronmotor	34
3.1.2	Test af 2,4 kW PM motor.....	36
3.1.3	Sammenligning	37
3.2	Test af mellemstor asynkronmotor og PM motor	39
3.2.1	Test af 5,5 kW asynkronmotor	39
3.2.2	Test af 5,2 kW PM motor.....	41
3.2.3	Sammenligning	43

3.3	Test af stor asynkronmotor og PM motor	44
3.3.1	Test af 18,5 kW asynkronmotor	44
3.3.2	Test af 19,2 kW PM motor.....	46
3.3.3	Sammenligning	48
3.4	Test af små asynkronmotorer og EC motorer	50
3.4.1	STEF 1	51
3.4.2	STEF 2	52
3.4.3	Motron 150 W.....	53
3.4.4	Sammenligning	54
3.4.5	STEF 3	55
3.4.6	Motron 550 W.....	56
3.4.7	Sammenligning	57
3.4.8	STEF 4	58
3.4.9	Motron 750 W.....	59
3.4.10	Sammenligning	60
4	Ventilatorer	62
4.1	Test af store ventilatorer	62
4.1.1	Test af GTLB-1-063 ventilator	62
4.1.2	Test af GTHB-3-063 ventilator	67
4.2	Test af små ventilatorer	71
4.2.1	Test af STEF 1, 2, 3 og 4 tagventilatorer	72
5	Pumper	77
5.1	Test af pumper	77
5.1.1	Test af NSL 80 - 265	77
5.1.2	Test af NSL 80 - 215	82
6	Besparelsespotentiale ved udskiftning af traditionelle asynkronmotorer med PM motorer	87
6.1	Indsamling af motordata	87
6.1.1	Asynkronmotorer	87
6.1.2	PM motorer	89
6.2	Besparelsespotentiale ved udskiftning	92
7	State og the art i forbindelse med børsteløse permanent magnet motorer	96
7.1	Abstract.....	96
7.2	Foreword	96
7.3	Introduction.....	97
7.3.1	Control	97
7.3.2	Design	97
7.3.3	Modelling	97
7.3.4	Simulation	97
7.3.5	Performance	97
7.3.6	Servo Applications	98
7.4	Discussion.....	99
	Andre kilder	116
	Appendiks 1	119

1 Indledning

Den traditionelle asynkronmotor med aluminium rotor er i dag langt den mest udbredte og solgte elmotor, men en ny og mere energieffektiv motortype – permanentmagnet motoren (PM motoren) - forventes i de kommende år at vinde større og større markedsandele. Flere motorfabrikanter i Europa, USA og Asien er nu begyndt at markedsføre PM motorer, som kan erstatte den traditionelle asynkronmotor.

Formålet med projektet er, at afdække fordele og ulemper ved at erstatte asynkronmotorer, herunder EFF1 motorer med PM motorer, herunder prisforskel.

Endvidere afdækkes, hvorledes virkningsgraden for PM motorer påvirkes ved lave belastningsgrader og ved forskellige reguleringsformer. For asynkronmotorer falder virkningsgraden dramatisk når virkningsgraden kommer under 20 - 25 %.

Endelig undersøges, hvor stort energibesparelspotentialet er, på landsplan, ved at erstatte asynkronmotorer med PM motorer.

Studiet indbefatter laboratorietests af PM motorer, som foretages på TI's motorprøvestand.

1.1 Opbygning af rapport

Rapporten er opbygget i 5 sektioner:

- Kapitel 2, motorteori
- Kapitel 3, test af motorer og frekvensomformere
- Kapitel 4, test af ventilatorer
- Kapitel 5, test af pumper
- Kapitel 6, kortlægning og besparelspotentiale

Kapitel 2 forklarer og illustrerer de forskellige elmotorers virkemåde og PM motorens særlige egenskaber. Dette afsnit beskriver også state of the art i forbindelse med PM motorer samt pålidelighed af PM motoren.

Kapitel 3 viser resultaterne af tests på asynkronmotorer (og frekvensomformere) i tre forskellige størrelser (2,2 kW, 5,5 kW og 18,5 kW).

Endvidere ses resultaterne af tests på PM motorer (og frekvensomformere) i tre forskellige størrelser (2,4 kW, 5,2 kW og 19,2 kW).

Resultaterne er præsenteret i kurver, der viser virkningsgrader som funktion af belastningsgrader.

Kapitel 4 viser tests på to af Ølands ventilatorer (mellem og stor størrelse) foretaget i TI's ventilationslaboratorium. Ventilatorerne er forsynet med henholdsvis EFF1 asynkronmotorer (5,5 kW og 18,5 kW) samt PM-motorer (5,2 kW og 19,2 kW). Testene er foretages ved varierende omdrejningstal på ventilatorerne samt konstante og kvadratiske differenstryk. Der er foretaget tests ved 10, 20, 40, 60, 80, 100 og 120 % belastningsgrad.

Kapitel 5 viser tests på to af DESMI's cirkulationspumper (mellem og stor størrelse) foretaget i TI's pumpelaboratorium. Pumperne er forsynes med henholdsvis EFF1 (5,5 kW og 18,5 kW) asynkronmotorer og PM-motorer (4,5 kW og 19,7 kW). Testene er foretages ved varierende omdrejningstal på pumperne samt konstante og proportionale differenstryk. Der foretaget tests ved 10, 20, 40, 60, 80, 100 og 120 % belastningsgrad.

Kapitel 6 indeholder en detaljeret kortlægning af elforbruget til motordrift i industrien, opdelt på brancher, teknologier (ventilation, pumper, trykluft, køling, hydraulik og anden motordrift) og delkomponenter samt en opgørelse af besparelspotentiallet på dette elforbrug ved udskiftning af eksisterende motorer til PM motorer.

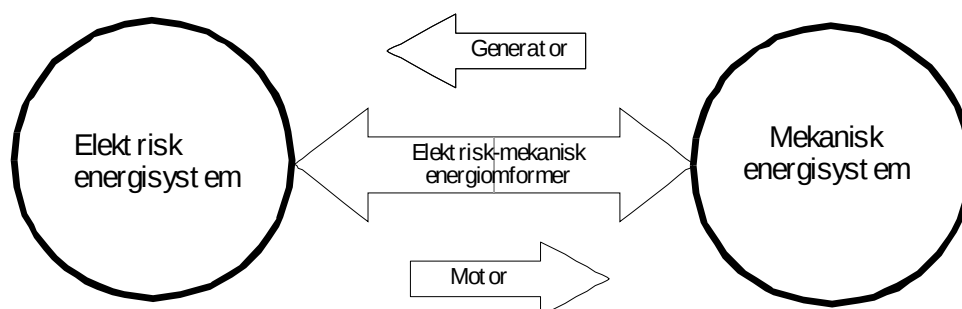
2 Motor teori

2.1 Elmotorers virkemåde og PM modellens særlige egenskaber

2.1.1 Baggrund og introduktion

Denne note udgør en beskrivelse af elektriske maskiner og deres virkemåde. Der omtales forskellige typer af elektriske maskiner, der finder anvendelse i industrien og som anbefales af forskere. Det er målet at forsyne energirådgivere og industriingeniører med en indsigt i, hvordan elektriske maskiner fungerer, således de kan blive klædt på til at forklare til andre, hvad der er væsentligt ved elektriske maskiners virkemåde.

En elektrisk maskine omformer elektrisk effekt til mekanisk effekt eller omvendt. Den er en energiomformer. Når der tilføres elektrisk effekt for at anvende mekanisk effekt kaldes den en elektromotor. Omvendt, hvis der tilføres mekanisk effekt for at få elektrisk effekt hedder den en generator. I princippet er en motor og en generator en og samme maskine, og i mange tilfælde kan den samme fysiske maskine anvendes både til motor og generator.

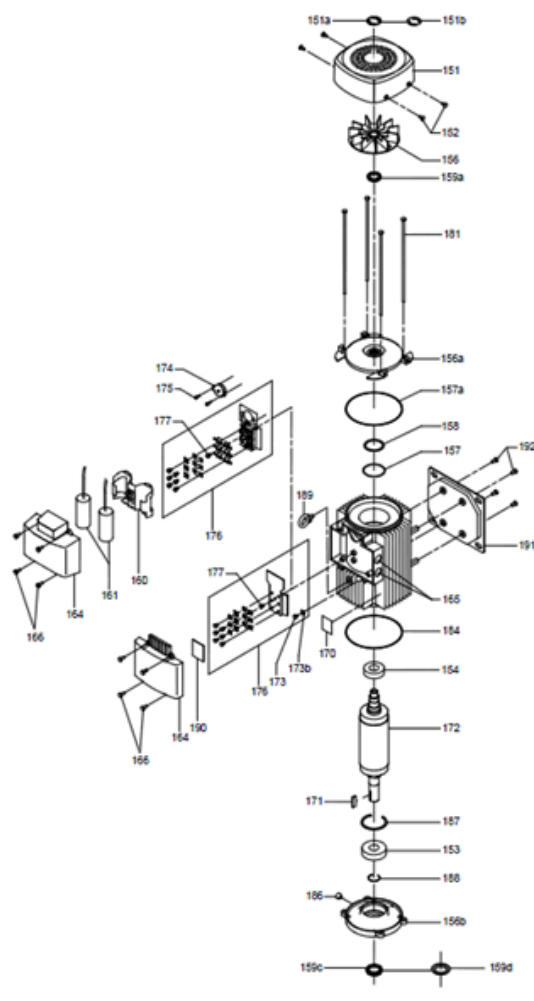


Figur 3.1. En elektrisk maskine omformer elektrisk energi til mekanisk energi og omvendt

Vi vil se nærmere på selve virkemåden for senere at beskrive de forskellige motortyper nærmere. Hvordan kan en elektrisk maskine omforme elektriske energi til mekaniske energi og omvendt?

2.1.2 Mekanisk konstruktion

7.3 Exploded view, MG 90 - MG 132



Figur 3.2. Skitse over motorkomponenter. (Fa. Grundfos A/S)

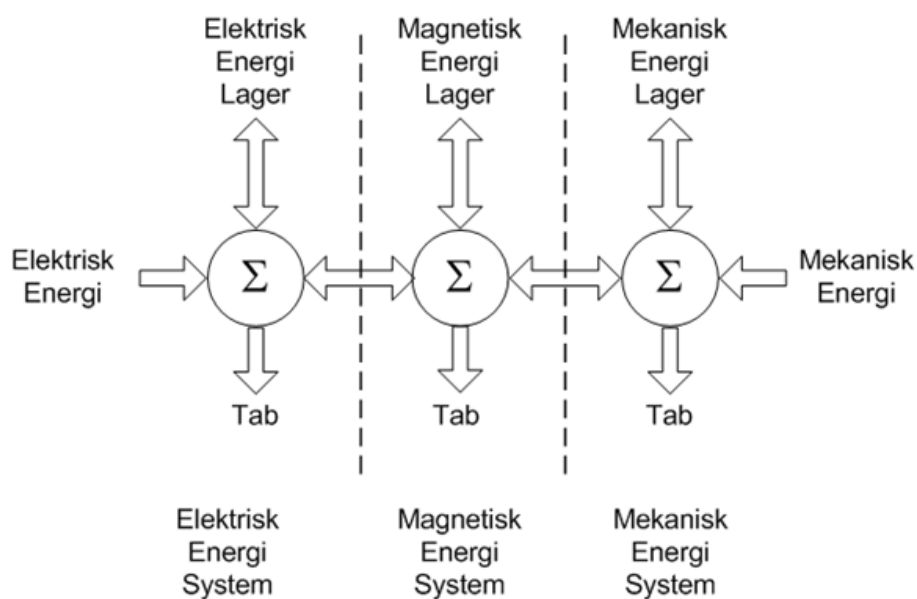
2.1.3 Generel virkemåde for elektriske maskiner

Alle typer af roterende elektriske maskiner fungerer efter samme princip. Den stationære del, statoren, fremstiller et magnetisk felt, der påvirker et magnetisk felt, som fremstilles på den roterende del, rotoren. Denne indbyrdes påvirkning skaber et moment, der skal tilføres udefra (generator) eller som kan anvendes til mekanisk arbejde (motor).

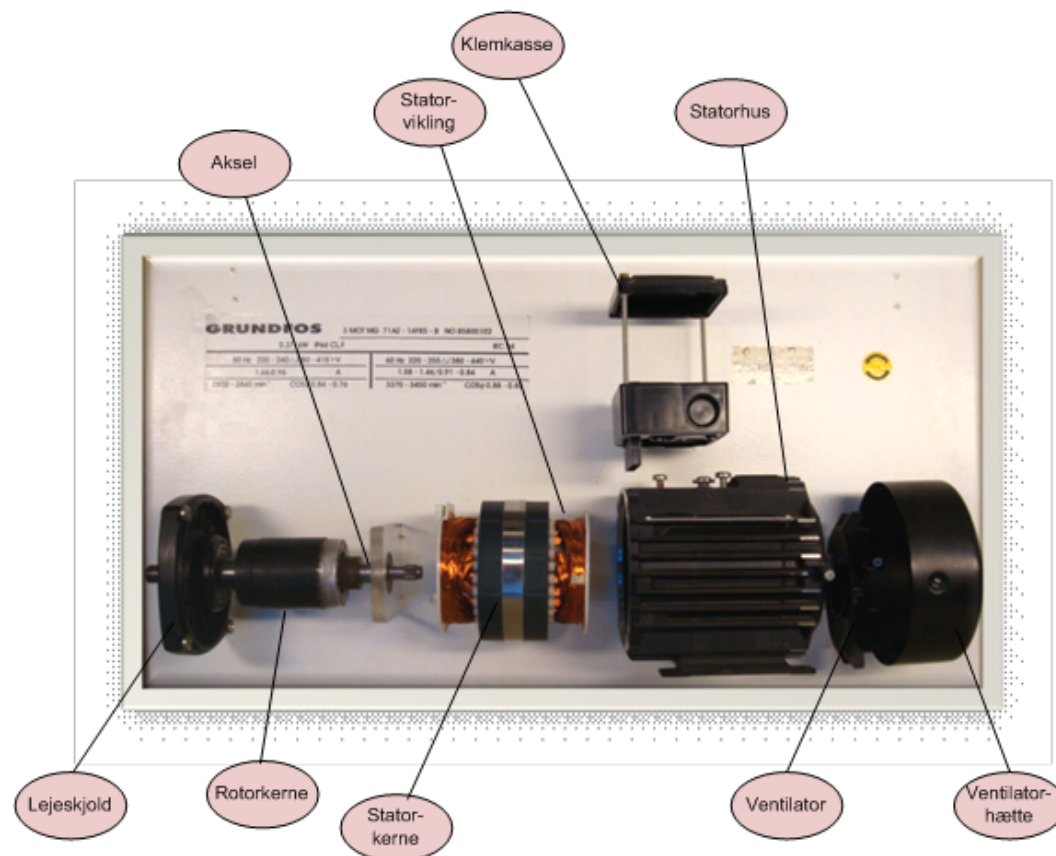
Når magnetfelterne mødes i luftspaltet, blandes de med hinanden, og bliver til et enkelt magnetfelt. Det er dette magnetfelt, der kobler den elektriske verden til den mekaniske verden.

En anden måde at betragte elektriske maskiner på er, at der først konverteres elektrisk energi til magnetisk energi for senere at konvertere magnetisk energi til mekanisk energi. Denne

proces er ideel og reversibel. Undervejs lagres energi i alle former. På denne måde er lagring af energi også en reversibel proces. I alle energisystemer forekommer der tab af energi. En målsætning kan være at sørge for, at tabene minimeres.



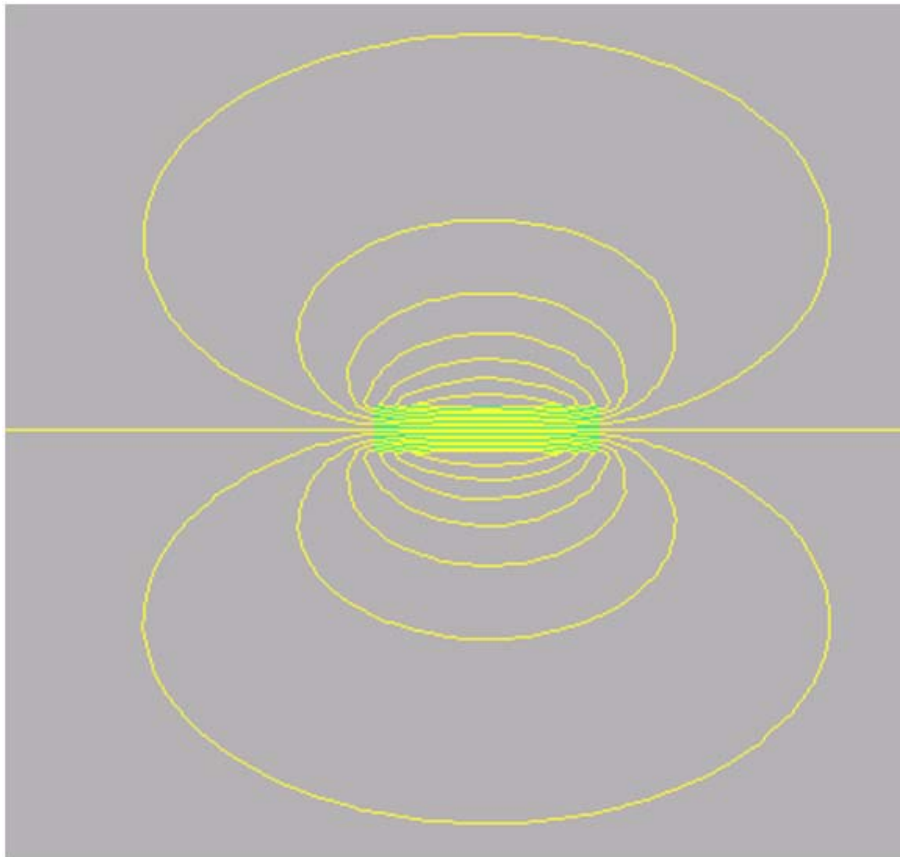
Figur 3.3. Konceptdiagram over vejen fra elektrisk energi til mekanisk energi. Under stationære drift kræves energiligevægt



Figur 3.4. En afmonteret asynkron maskine.(foto: Krisztina Leban)

2.1.4 Fremkaldelse af et magnetfelt

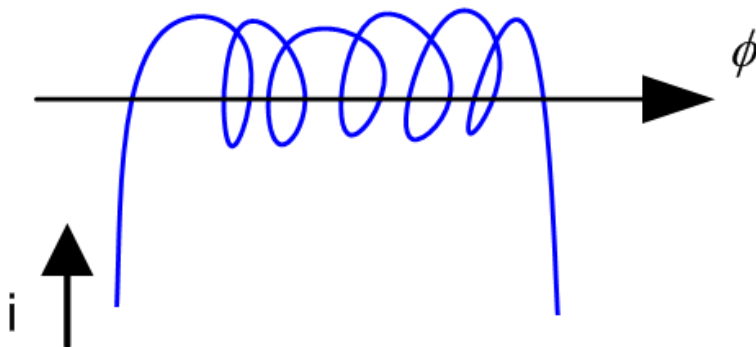
Magnetfeltet kan fremkaldes på flere forskellige måder. Et magnetfelt er en vektorstørrelse, der har både amplitude og retning. Det er en fordelt størrelse, som beskrives vha. sammenklumpede variabler. Magnetfeltets særlige egenskab er, at det er kontinuerligt. Dvs. det starter ingen steder, og det slutter ingen steder. Det følger simpelthen i hælene af sig selv.



Figur 3.5. FEM beregningsresultatet viser et magnetfelt, der fremstilles af en permanent magnet i luft

2.1.5 Induktion af et magnetfelt ved at der løber strøm i en spole

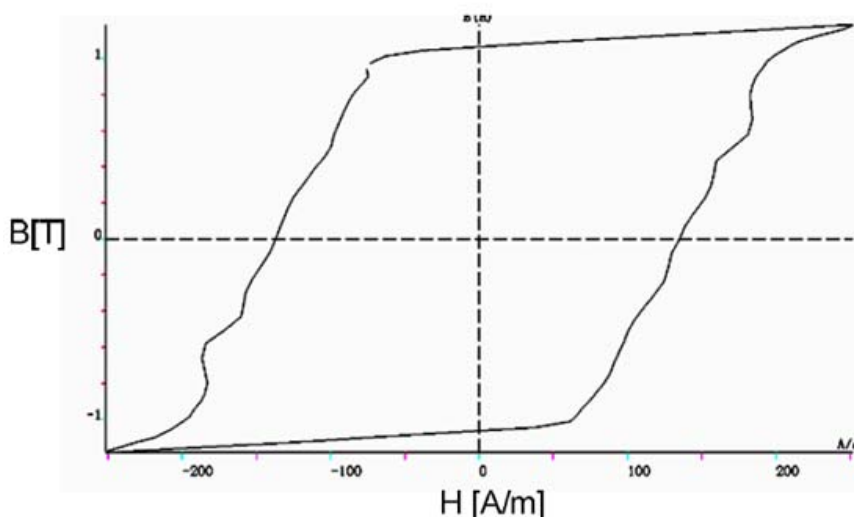
En af de måder, der kan anvendes til at inducere et magnetisk felt på, er at lade strøm løbe i en spole. En spole af f.eks. kobbertråd, der er en rigtig god leder for elektrisk strøm, vikles i en spiral eller en helix. Idet der løber elektrisk strøm i spolen, induceres et magnetfelt, som i selve spolen har retning langs spolens geometriske akse. Ved at ændre på strømmens størrelse kan der ændres på magnetfeltets størrelse.



Figur 3.6. Hvis der løber strøm i en spole, induceres et magnetfelt langs spolens akse

2.1.6 Permanent magnet

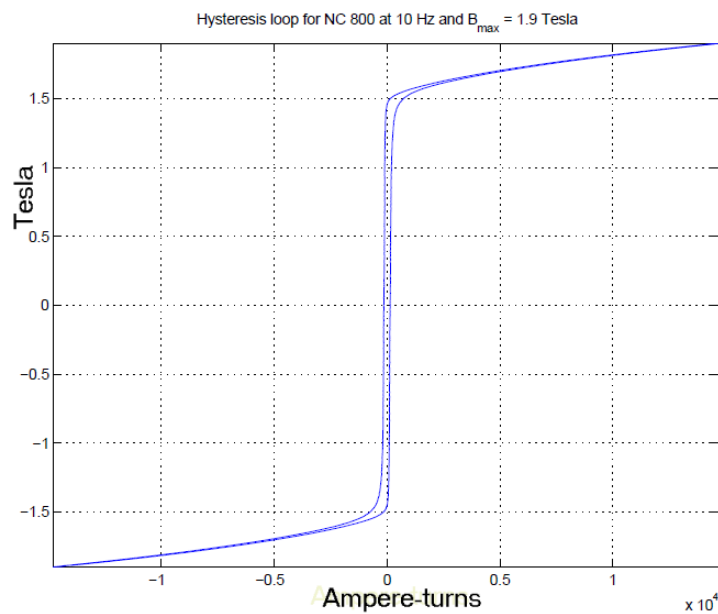
En alternativ måde til fremstilling af et magnetisk felt er at anvende en permanent magnet. En permanent magnet magnetiseres en gang for alle, hvis den er anvendt indenfor et specificeret område. Magnetfeltet ændrer sig dog som funktion af ekstern belastning. Ændringer kan forudses vha. BH kurven og en belastningslinje. Belastningslinjen fastsættes af geometrien samt de omkringliggende materials egenskaber.



Figur 3.7. Målt B-H kurve for Neodymium Iron Boron permanent magnet materiale, fremstillet vha. en FLUX Loss Surface Model. (Se: Andre kilder 18).

2.1.7 Hvordan dirigeres magnetfeltet hen, hvor det skal anvendes?

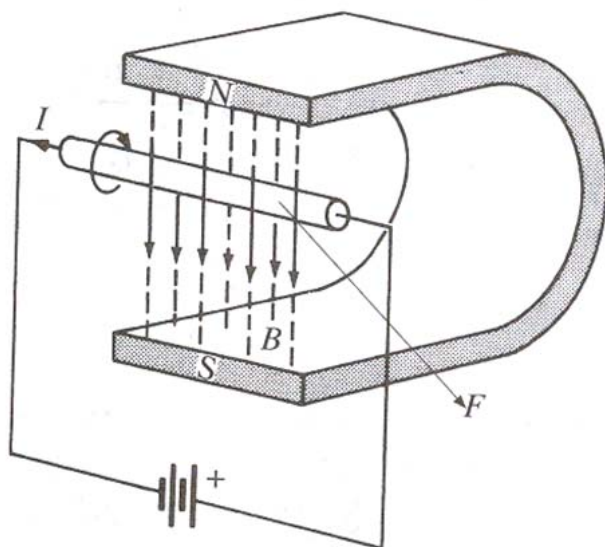
I en elektrisk maskine sker magnetfeltets energiomformning i luftspaltet imellem statoren og rotoren. Det er derfor væsentligt at dirigere magnetfeltet ind i luftspaltet. Man ønsker, at magnetfeltet går radialt over luftspaltet. Dette gøres ved hjælp af en kerne af 'blødt' ferromagnetisk materiale – almindeligvis jern. Bløde ferromagnetisk materialer er metaller, hvor BH kurven er smal, og hystereseseffekten er lille.



Figur 3.8. BH kurve for blødt ferromagnetisk materiale

2.1.8 Hvordan frembringes en mekanisk effekt?

I en roterende maskine kan mekanisk effekt beskrives som produktet af drejemoment og omdrejningstal. Den tilførte elektricitet kan beskrives som elektrisk effekt som produktet af spænding og strøm. Heldigvis er effekt et udtryk for den hastighed, hvorved energi flyttes. Energi er en meget generel størrelse, der er ens i alle verdener også den elektriske og den mekaniske. Det betyder, at vi har mulighed for både at konvertere energi fra den ene form til den anden og til at beregne, hvordan det foregår.



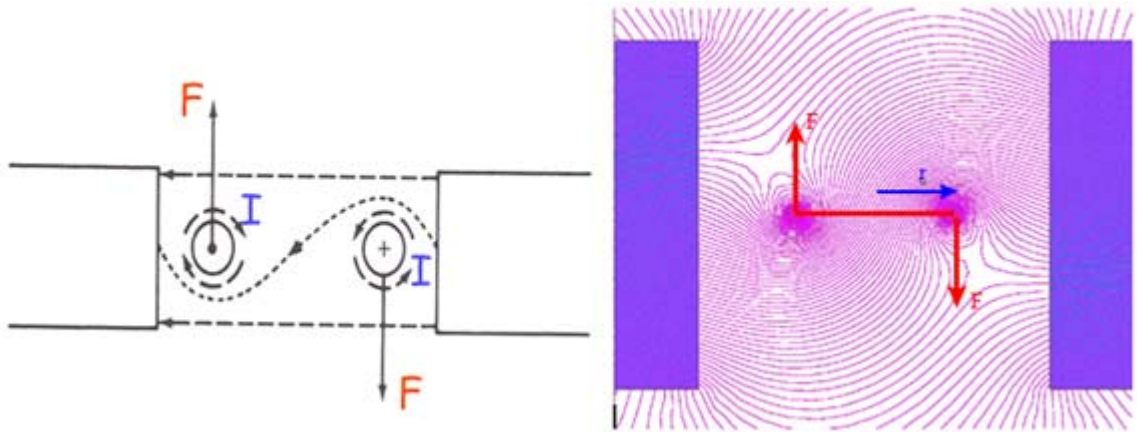
Figur 3.9. Diagram, der illustrerer Lorentz ligningen $F = B \cdot i \cdot L$

Som eksempel gengives her Lorentz ligningen for kraft som funktion af strøm og magnetfelt:

$$F = B \cdot i \cdot L$$

Hvor:

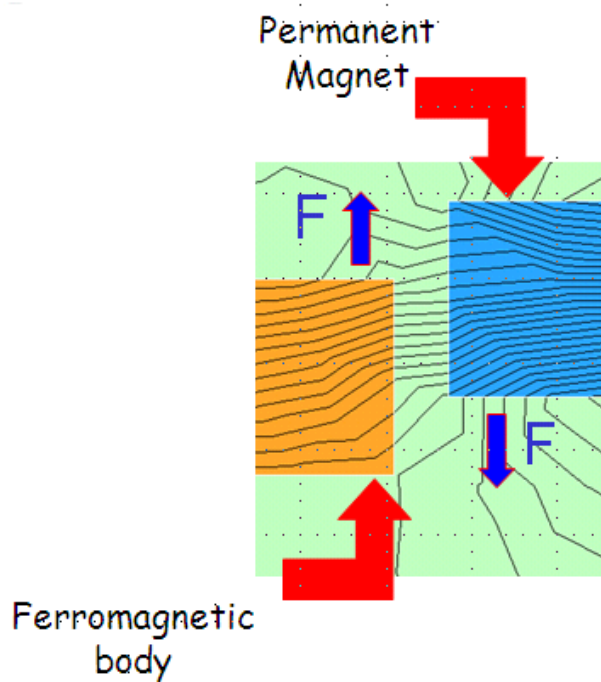
F står for kraft, B står for den magnetiske flukstæthed, i står for strømmen og L står for den aktive længde af strøm (dvs. strømmen, der flyder retvinkelt til magnetfeltet). Er der tale om en strømsløjfe eller spole, flyder strømmen i hver sin retning i de to spolehalvdele. På denne måde skabes et moment. Se figur 3.10 der illustrerer det moment der fremkommer af Lorentz ligningen.



Figur 3.10. Illustration af moment, der fremkommer af Lorentz ligningen. Strøm, der mærkes med •, kommer op fra papiret, og strømmen, der mærkes med +, går ind i papiret.

Princippet, der omfattes af $F = B \cdot i \cdot L$, gælder generelt for alle elektromotortyper, hvor strømmen påvirkes af et magnetfelt.

Der er et andet princip, der kan evt. gælde, hvis der er tale om udprægede poler i luftspaltet.



Figur 3.11. FEM tegning, der illustrerer trækraften imellem to magnetiske legemer, når de påvirkes af et magnetfelt

Disse to principper kan evt. gælde samtidigt og tilsammen dække alle former for energiomformning i elektriske maskiner.

Disse energiomformninger er reversible, hvorfor elektriske maskiner kan være både motorer og generatorer alt efter behov. Der kan dog forekomme energitab i dele af den elektriske maskine. Sammensætning af disse tab bestemmes af maskintype. Derfor omtales tab, efter maskintyperne er beskrevet.

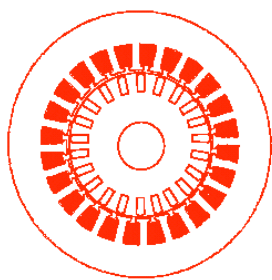
2.2 De forskellige maskintyper

I industrien og husholdningen forekommer der et antal forskellige typer elektriske maskiner. Hver af disse typer forekommer som flere forskellige undertyper. Billedet bliver herved meget tåget, og der er brug for en udredning til at forklare forskellen imellem disse og forklare deres egenskaber. Der omtales typiske applikationer med en kort omtale af fordele og ulemper ved de elektriske maskiner, der anvendes.

Forskellen imellem maskintyperne kan karakteriseres ved at anskue de enkelte maskiners tværsnit samt den måde, hvorpå de to magnetfelter frembringes.

Samtlige typer af elektriske maskiner blev opfundet for godt 100 år siden. Nogen kunne forsynes med strøm direkte fra el-nettet eller vha. enkle diodekredsløb. De kunne både starte og køre i drift vha. simple anordninger. Disse motortyper er veludviklede og finder meget udbredt anvendelse. Et godt eksempel er asynkronmaskinen, der blev industriens arbejdsheste og samtidigt er blevet meget udbredt i husholdningsmaskiner.

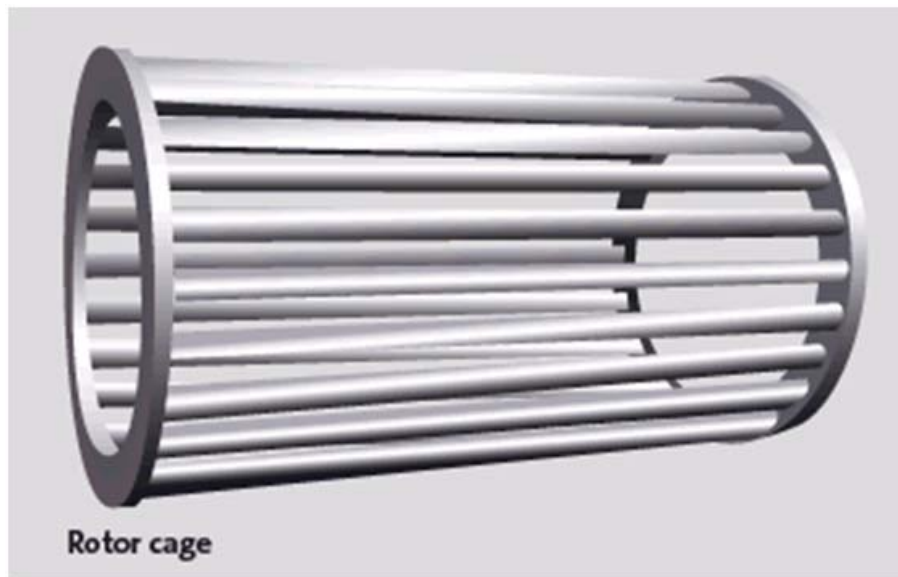
2.2.1 Asynkronmaskinen



Generelt kan konstruktionen af asynkronmaskinen karakteriseres ved, at den er udstyret med en vikling på statoren, der bærer strøm fra forsyningsnettet, samt en rotorvikling, hvor der induceres strøm af magnetfeltet. Flere typer af asynkronmaskinen forekommer, typisk kortslutningsmaskinen og slæberingsmaskinen.

2.2.1.1 Kortslutningsmaskinen

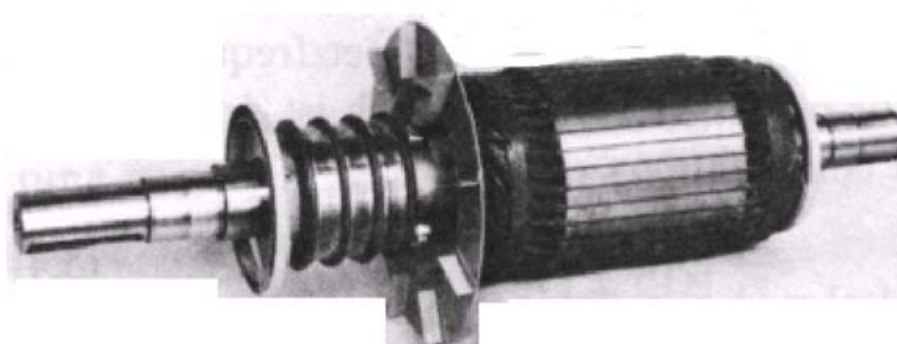
Kortslutningsmaskinen er den mest udbredte type asynkronmaskine. Navnet kommer af, at rotoren er kortsluttet på sig selv. Den er fremstillet af stangmateriale eller trykstøbte aluminium direkte i noterne uden yderligere isoleringsmateriale.



Figur 3.12. Viser rotorviklingsstrukturen på en kortslutnings asynkronmotor (Billede: Grundfos A/S).

2.2.1.2 Slæberingsmaskinen

Slæberingsmaskinen har været begrænset til store maskiner, men vinder nu frem som vindgenerator. Forskellen i konstruktionen fra kortslutningsmaskinen er, at rotoren er udstyret med en vikling beregnet til, at der kan tilkobles et eksternt kredsløb, som fungerer ved forholdsvis høj spænding. Derfor er rotorviklingen isoleret på samme måde som statorviklingen, og selve viklingen består af viklede spoler. Generelt udgør rotorviklingen tre faser, der føres ud til slæberinger. Se figur 3.13 som viser en asynkron motor rotor forsynet med slæberinge. Strømmen samles vha. kulbørster.



Figur 3.13. Rotor fra en asynkronmotor med slæberinge

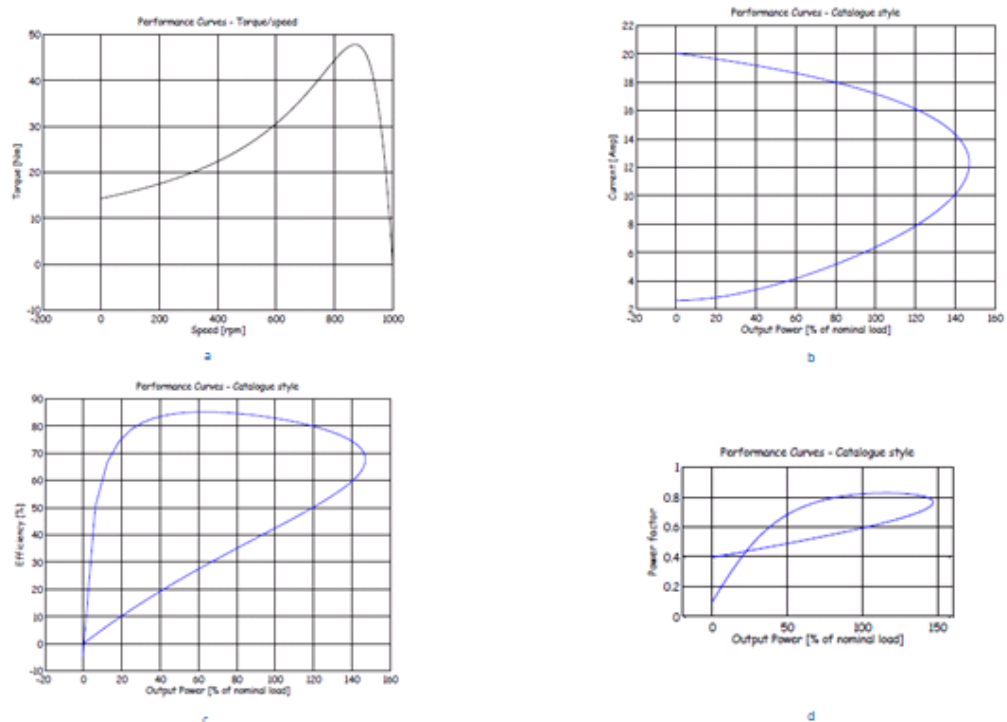
2.2.1.3 Asynkronmaskinens egenskaber

Asynkronmaskinens egenskaber bestemmes af konstruktionen. Vi vil se på de karakteristiske størrelser hver for sig.

Ved start er asynkronmotoren slet ikke magnetiseret, og der løber relativt meget strøm, ca. 6 ggr fuldlaststrømmen. Især, når der er tale om større maskiner, kan den store strøm være ganske uacceptabel. Det kan blive nødvendigt at tage forholdsregler, f.eks. med anvendelse af effektelektronik til startstrømsbegrænsning.

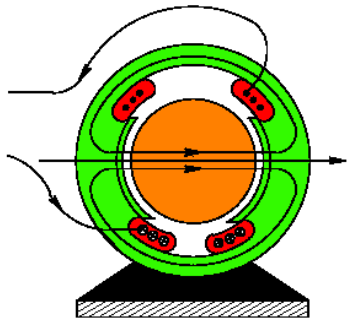
Da magnetisering af luftspaltet opretholdes vha. strøm i statorviklingen, kræves det, at statorviklingen tilføres magnetiseringsstrøm i hele den tid, motoren kører, uanset om den belastes eller ej. Det sker med en lille effektfaktor. Når motoren belastes, stiger strømmen ikke særlig meget, men effektfaktoren rettes op. Først når effektfaktoren er rettet op, begynder strømmen at stige.

Da der ikke er nogen magnetisering ved start, udvikles der intet moment i startøjeblikket, selvom der løber en stor startstrøm. Dog vokser momentet hurtigt, til det vi kender som det stationære startmoment. Derefter følger momentet den kendte momentkurve.



Figur 3.14. Katalogkurver for asynkronmotoren. a) moment som funktion af omdrejningstal b) den tilførte strøm som funktion af akseleffekt c) virkningsgrad som funktion af akseleffekt og d) effekt faktor som funktion af akseleffekt.

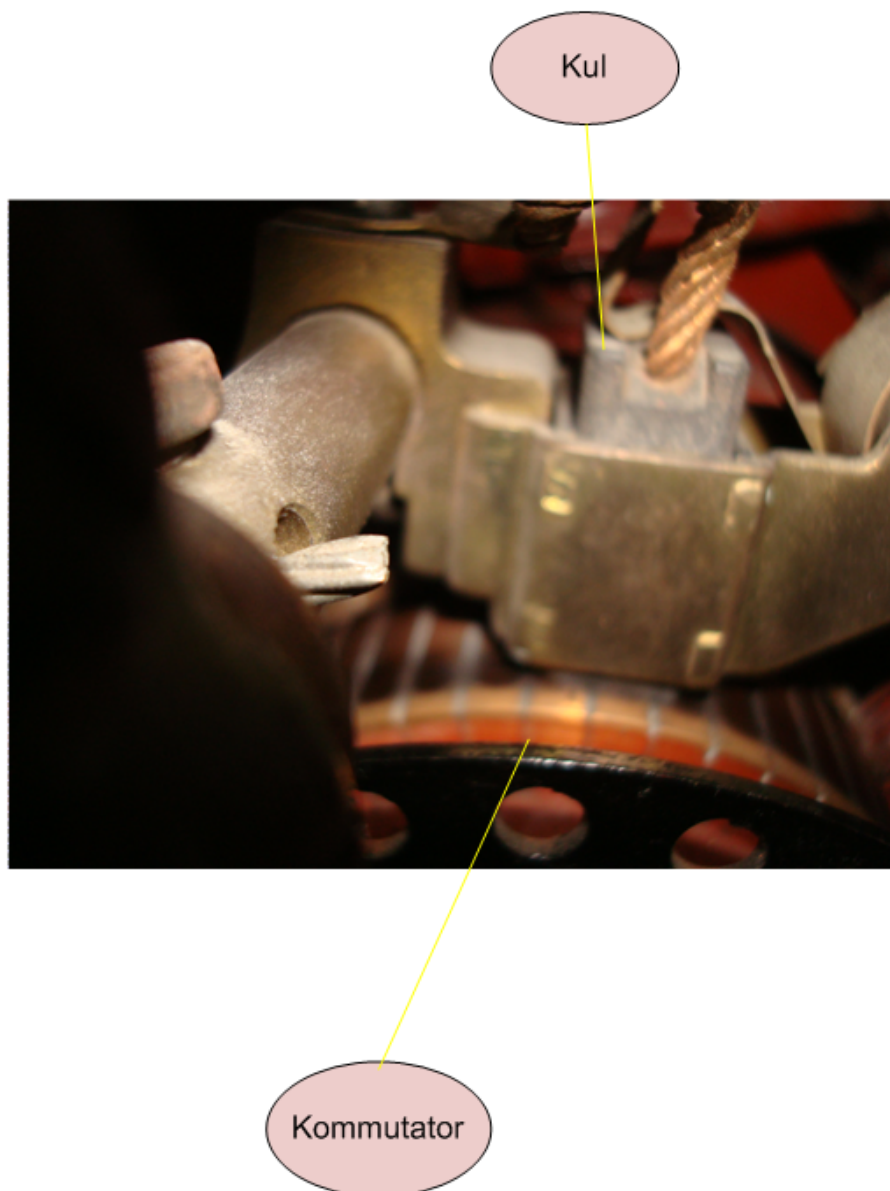
2.2.2 DC maskinen



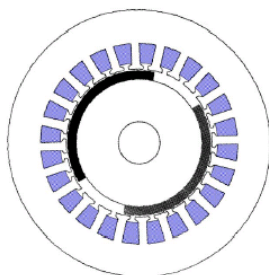
Den traditionelle DC (jævnstrøms-) maskine består af et stator åg, hvor der på en eller anden måde frembringes et magnetfelt, og et roterende anker, der leder laststrømmen. Laststrømmen føres til det roterende anker vha. en kommutator og kul, der er en mekanisk form for et kontaktsystem. Kommutatoren sørger for, at strømmen føres i den helt rigtige ledning på ankeret på det helt rigtige tidspunkt. Det er en nødvendig funktion for, at motoren kan fungere, når den er fødet med jævnstrøm.

DC maskinen er ret fleksibel, da magnetiseringsstrømmen kan gøres afhængig af flere forskellige funktioner, hvilket bestemmer, hvordan DC maskinen fungerer ved start, opløb og belastning.

En fremmedmagnetiseret maskine har særskilt strømforsyning til magnetiseringsviklingen. Herved opnås en konstant, styrbare magnetiseringsstrøm.

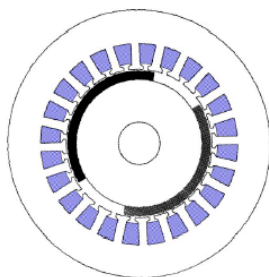


Figur 3.15. Billede af DC motor, der viser kommulator og kul



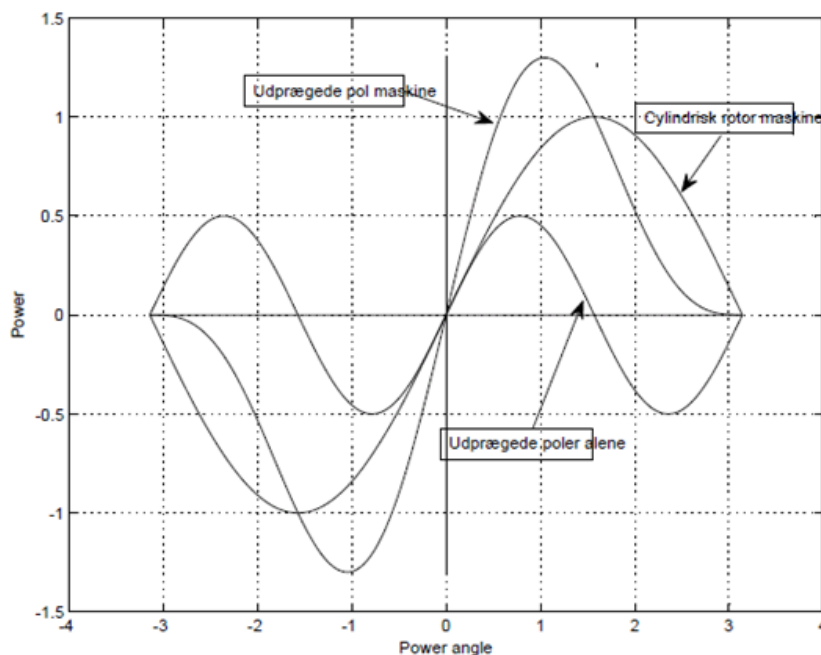
I en nyere variant af DC maskinen, der opstod som følge af den stigende anvendelse af effektelektronik, fandt man på, at man med fordel kunne erstatte kommulator- og kulsystemet med et effektelektronisk system. Her sker kommuteringen ved, at styringen til effektelektronikken skifter afhængigt af magnetfeltets position relativt ankerets vikling. Her anbringes ankeret på statoren og magnetfeltet på rotoren. Generelt frembringes magnetfeltet vha. en permanent magnet.

2.2.3 Synkronmaskinen

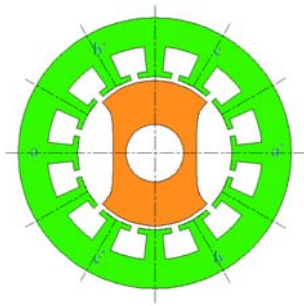


Synkronmaskinen karakteriseres ved, at der ved at føde strøm til en flerfaset statorvikling fra en flerfaset strømforsyning dannes et roterende magnetisk felt i luftspaltet. Rotoren er af en sådan art, at der kun dannes et brugbart moment, idet rotoren drejer synkront med samme omdrejningstal som magnetfeltet. Umiddelbart er det indlysende, at det kan lade sig gøre, hvis rotoren er magnetiseret med lige så mange magnetiske poler som statorviklingen.

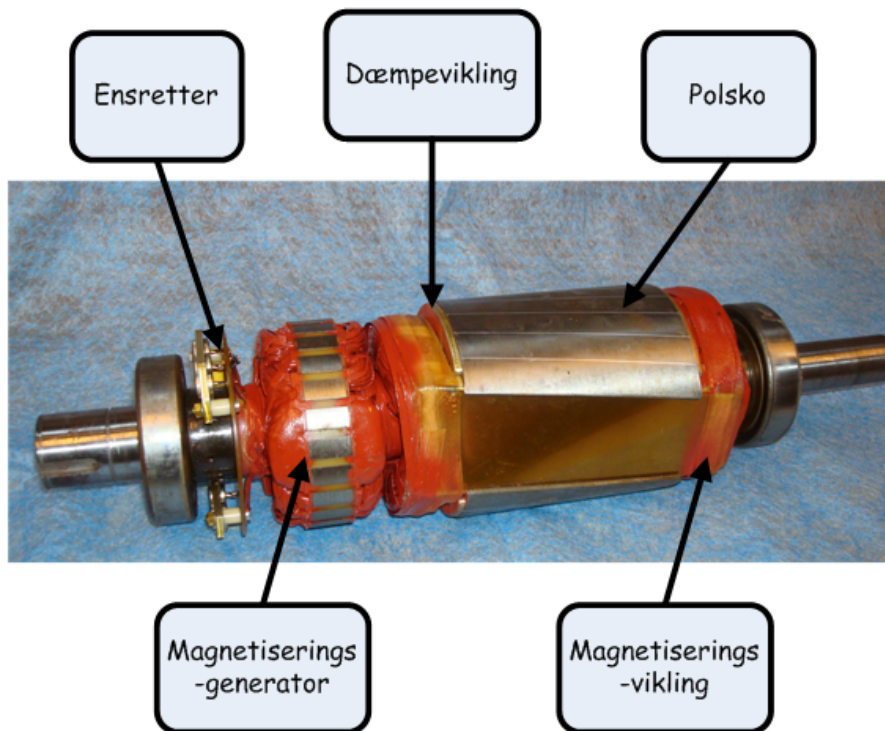
Magnetiseringen kan ske vha. permanente magneter, alternativt ved at tilføre strøm til rotorens spole via slæberinge. Et alternativ til slæberinge er, at montere en lille magnetiseringsgenerator på akslen, hvor den fremstillede vekselstrøm ensrettes af en diodebro der også er monteret på akslen.



Figur 3.16. Udgivet effekt for en synkronmaskine som funktion af rotorens effekt vinkel i tre tilfælde. For cylindrisk rotor maskine med magnetisering, for maskine med udprægede poler alene uden magnetisering samt for magnetiseret maskine med udprægede poler

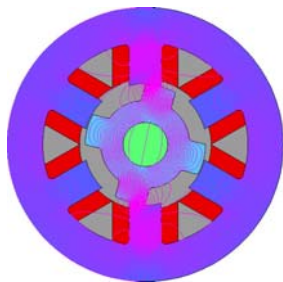


Synkronmaskinen findes i to kategorier mere. En med cylindrisk rotor og en med udprægede poler på rotoren. De to versioner giver anledning til forskellige karakteristiske momentkurver, når motoren er i synkronismen. Da synkronmaskinen vanskeligt kan dæmpe svingninger, hvis de opstår ved synkronismen, udstyres den oftest med en dæmpevikling på rotoren. Er synkronmotoren dog servostyret, kan der inkluderes dæmpning i styringen. I så fald udelades dæmpeviklingen.



Figur 3.17. Rotor til en Synkronmaskine med monteret magnetiseringsgenerator og ensretter. Rotoren har udprægede poler og dæmpevikling.

2.2.4 Switchede reluktansmaskinen



En switchede reluktansmaskine er udstyret med udprægede poler både på stator og rotor, men der er ikke lige mange poler på stator og rotor. Kun statoren udstyres med strømførende spoler.

Ved at der switches strømmen i de forskellige statorspoler i den rigtige sekvens, trækkes først den ene rotor pol frem og så den næste, osv.

Det er nødvendigt med et styresystem, der har kendskab til rotorens position relativ statoren så strømmen kan switches til den aktuelle spole.

2.2.5 Generel sammenligning af de forskellige motortyper

Asynkronmaskinen er den mest udbredt industrielle maskine. Det skyldes, at konstruktionen er meget stærk, fordi der ikke er nogen isoleret vikling på rotoren. DC motoren og dens nær slægtning universalmotoren er også meget udbredt, da den er nem at fremstille til små effekter og lave spændinger. Synkronmaskinen med dens isolerede vikling på rotoren til magnetisering, tjener derfor tit som generator og som store industrimotor. Den switchede reluktansmotor er lige så stærk en konstruktion som asynkronmaskinen, om ikke stærkere. Det har vist sig vanskeligt at styre den akustiske støj i denne maskintype, hvilket bidrager til, at den ikke er så udbredt i anvendelse som en gang spået.

2.3 Typiske applikationer

De forskellige maskintyper finder applikation i forskellige arbejdsmaskintyper. Fordeling af maskintyper over de forskellige applikationer sker ved, at der sammenlignes maskinegenskaber med applikations krav. Fælles for alle maskintyper er, at de kan styres vha. effektelektronik.

2.3.1 Asynkronmaskinen

Typiske applikationer for asynkronmaskinen omfatter næsten alle industriapplikationer. Asynkronmaskinen er især velegnet til en lukket udførelse, der kan blive såvel støvtæt som stænkstæt. Asynkronmaskinen kan præstere en meget lang levetid uden vedligeholdelse, og der forekommer ingen gnister under normale drift.

Det bevirker, at asynkronmotoren finder applikation overalt i industrien, til søs, i landbruget samt til husholdnings brug.

Mange asynkronmaskiner fødes med en inverter, der forsyner maskinen med variabel frekvens. Det bevirker, at maskinens omdrejningstal kan tilpasses det af arbejdsmaskinen ønskede omdrejningstal. Det er en stor fordel, da man herved også kan spare energi.

2.3.2 DC maskinen

DC maskinens anvendelse begrænses af kul-kommutator kombinationen. Der slides på både kul og kommutator, som skaber ledende støv, der kan sætte sig på viklingen. Det er til skade for viklingens isolationsmaterialer. Det bevirker, at DC maskinen skal anbringes, hvor der er adgang til vedligeholdelse.

Til gengæld er styring af DC-maskinen forholdsvis enkelt, da omdrejningstallet afhænger af spændingen og momentet af ankerstrømmen. DC maskinen er den traditionelle elektriske maskine, der anvendes i applikationer med variabel hastighed.

DC maskinen finder anvendelse som traktionsmotor på jernbaner, trolleybusser, og sporvogne. Visse applikationer finder også anvendelse til søs og på olieplatforme.

En særlig klasse af DC maskine, den seriekoblet DC maskine, kan også køre på enfaset AC. Den er en universalmotor. Denne finder applikation i visse husholdningsapplikationer, f.eks. støvsugeren og vaskemaskinen, men også mange steder, hvor den acceptabel levetid er ret kort, og motoren skal være billig.

2.3.3 Synkronmaskinen

Synkronmaskinen løber i nøjagtigt det omdrejningstal, der bestemmes af den tilførte frekvens. Det er både en fordel og en ulempe. Det er en fordel, at man kan bestemme omdrejningstallet præcis, men en ulempe, når maskinen skal styres, da den indbyggede dæmpning er forsvindende lille. Maskinen kan gå i selvsving, hvis ikke styringen kan dæmpe den.

En ulempe mere kan være der, hvor magnetfeltet stammer fra en vikling på rotoren. Det betyder, at der skal tilføres strøm rotoren vha. kul og slæberinge. Problemet her ligner meget det med kul og kommutator på DC maskinen. Der forekommer slid, der afgives ledende støv, og samtidig kræver maskinen vedligeholdelse.

Det bevirker, at synkronmaskinen finder anvendelse der, hvor belastningen er meget jævn, fordi det roterende system indeholder et stort inertimoment. Det er tit store industrielle applikationer i forbindelse med forsyningssystemet eller lignende.

I takt med udviklingen i effektelektroniske styresystemer og permanente magneter er der udviklet permanent magnet synkronmaskiner (PMSM). PMSM kan være meget effektive og stærke, men de skal have et avanceret styresystem, da dæmpningen i disse for synkronmaskine er lige nul. Det betyder, at PMSM i handel er tit en servomaskine.

2.3.4 Switched reluktansmaskinen

I teorien er den switchede reluktansmotor mindst lige så anvendelig som asynkronmaskinen. Der skal altid anvendes en effektelektronisk konverter sammen med en switchede reluktansmotor, uden kan den ikke fungere. Der kan dog ikke anvendes den samme styring som for asynkronmaskinen. Styringen er mere kompliceret for den switchede reluktansmotor.

Oven i den nævnte ulempe, er det svært at fremstille en switchede reluktansmaskine, der er støjsvag. Det er en stor ulempe i forbindelse med husholdningsmaskiner.

Alt i alt kendes der kun til få eksempler på anvendelse af switchede reluktansmotoren. En, der fremstiller udstyr til minedrift, en vaskemaskine og et roterende luftfilter til store airconditionanlæg. Af de nævnte applikationer er vaskemaskinen af ukendte årsager taget ud af produktion.

2.4 Effektivitet og tab

I dagens Danmark fokuseres der meget på energieffektivitet. Det vil sige, at enhver drivsystem skal gennemføre arbejdet for lavest mulig energiforbrug. Effektiviteten kaldes ofte for virkningsgraden.

I el-maskinen udvikles forskellige former for tab under drift. En del af tabene stammer fra elektrisk strøm, der løber i spolerne, da disse indeholder modstand. Det hedder Ohmsk tab eller kobbertab og afhænger direkte af den effektive strøm i anden potens. Det resterende tab stammer fra ommagnetiseringen af det jern, der anvendes i kernen. Dette kaldes for jerntab.

2.4.1 Asynkronmaskinen

Asynkronmaskinen er forsynet med to viklinger, en på statoren og en på rotoren. Viklingen på statoren er koblet til energikilden og fører strøm, der svarer til belastningen, til frembringelse af det magnetiske felt. Rotoren fører kun strøm, der svarer til belastningen. Det er den effektive værdi af strømmen, der bestemmer kobbertabet.

Jerntabet bestemmes af en sammensat kombination af den magnetiske induktion og frekvensen af strømforsyningen. Induktionen bestemmes af en sammensat funktion af spænding og frekvens. Konstruktionens materialeegenskaber og geometri spiller en meget vigtig rolle i jerntabet. Herved bliver det klart, at det er et kompliceret stykke arbejde at forudbestemme jerntabet. Da frekvensen på rotoren er lige slipfrekvensen (ca. 5-7 % af stator strømmens frekvens), plejer det almindelige jerntab i rotoren at være forsvindende lille.

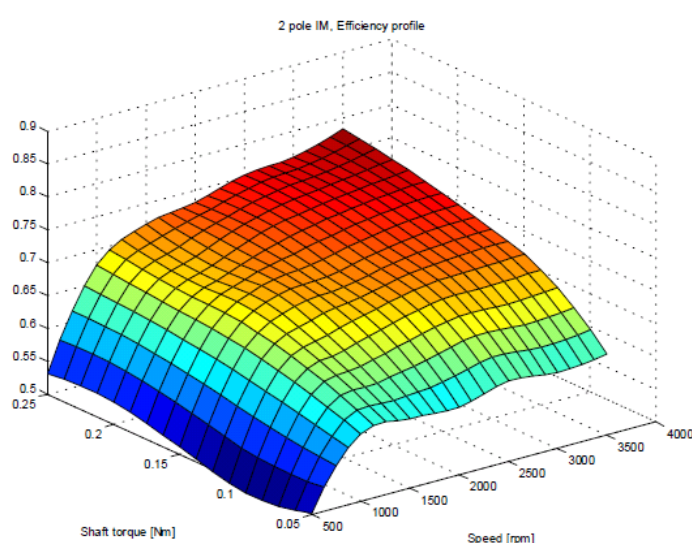
I forbindelse med udformningen af de noter, statorviklingen og rotorviklingen ligger i, kan der opstå overfrekvenser, som er overtoner, der kan fremkalde ekstra jerntab i både rotor og stator, akustisk støj og momentpendlinger. Situationen her er forværret af, at asynkronmaskinen fremstilles med så smal en luftspalte som muligt imellem stator og rotor med en lille magnetiseringsstrøm for øje.

Under almindelig stationær drift ved fuldlast kan asynkronmotoren konstrueres til at fungere med en høj virkningsgrad. Det kræver en erfaren konstruktør og en passende mængde materialer.

Den hårde konkurrence på markedspladsen fører til, at indkøbere er tilbøjelig til at købe den umiddelbart billigste maskine. For at holde indkøbsprisen ned må konstruktøren begrænse i mængden samt anvende gammelt værktøj til fremstilling af maskinen. Begge af disse fører til et øget tab og en derved nedsat virkningsgrad.

Virkningsgraden på en givet asynkronmaskine større end 5kW belastet ved konstant mærkespænding og -frekvens vil typisk starte fra 0 ved tomgang, stige ved halv fuldlast til omkring 75 % og videre til omkring 90 % ved fuldlast. Derefter falder virkningsgraden igen til 0, når rotoren blokeres.

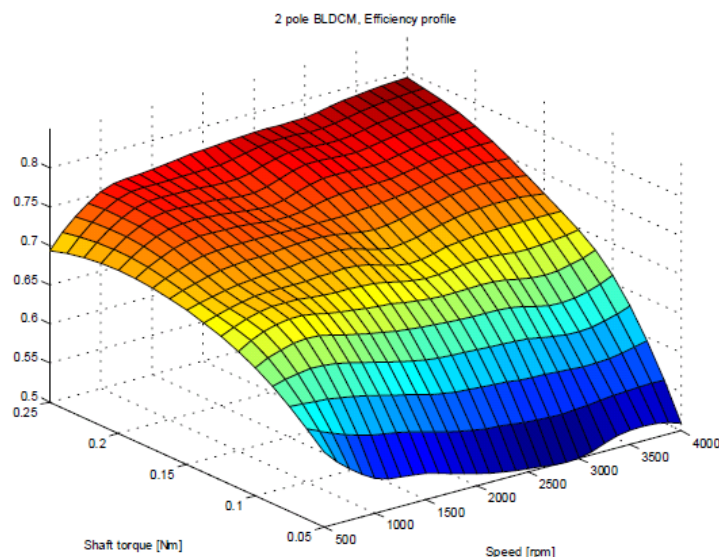
Situationen bliver ret indviklet, når man tilfører asynkronmaskinen strøm fra en frekvensomformer. Virkningsgraden herved ændrer sig som funktion af omdrejningstal og moment. Figur 3.18 viser en kurve optaget på en ca. 25 W motor. Ved optagelsen justeres den tilført spænding og frekvens for at give max mulig virkningsgrad for hvert målepunkt. Der ses, at det er vanskeligt at opretholde en høj virkningsgrad ved lave hastighed uanset moment. Det modsatte er tilfældet ved højere hastigheder, hvor der fås rimelig høj virkningsgrad for en belastet motor, hvis hastigheden er større end 1000 omdrejninger i minuttet.



Figur 3.18. Kurve med overflade, der viser udviklingen i virkningsgrad for en 25 W 2 polet asynkronmaskine som funktion af omdrejningstal og moment

2.4.2 DC maskinen

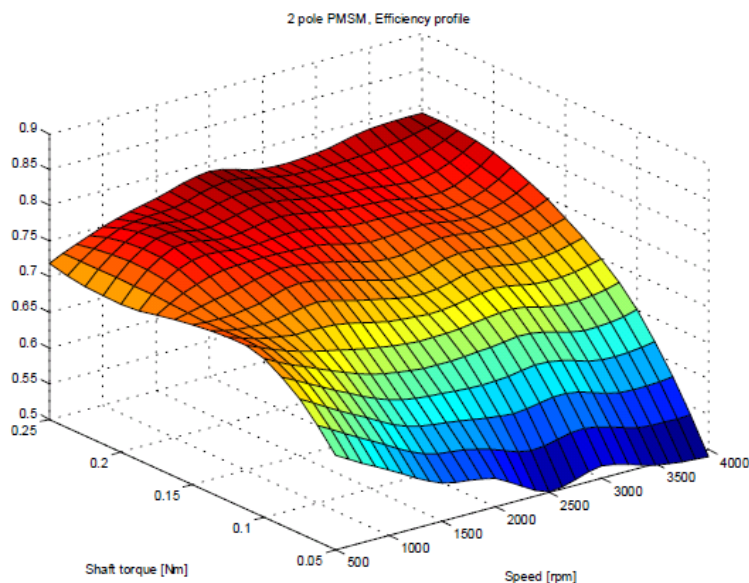
DC maskinen anvendes næsten altid som en variabel hastighedsmaskine. Ankerstrømmen afhænger direkte af momentet. Det samme sker med den børsteløse DC maskine. Figur 3.19 viser udviklingen i virkningsgraden på en lille børsteløse DC maskine. Når den sammenlignes med figur 3.18, kan det ses, at virkningsgraden for DC maskinen holder sig pænt op over et stort hastighedsområde i modsætning til asynkronmaskinen, hvor det er svært at holde en høj virkningsgrad ved lave omdrejningstal.



Figur 3.19. Kurve med overflade, der viser udviklingen i virkningsgrad for en 25 W 2 polet børsteløse DC maskine som funktion af omdrejningstal og moment

2.4.3 Synkronmaskinen

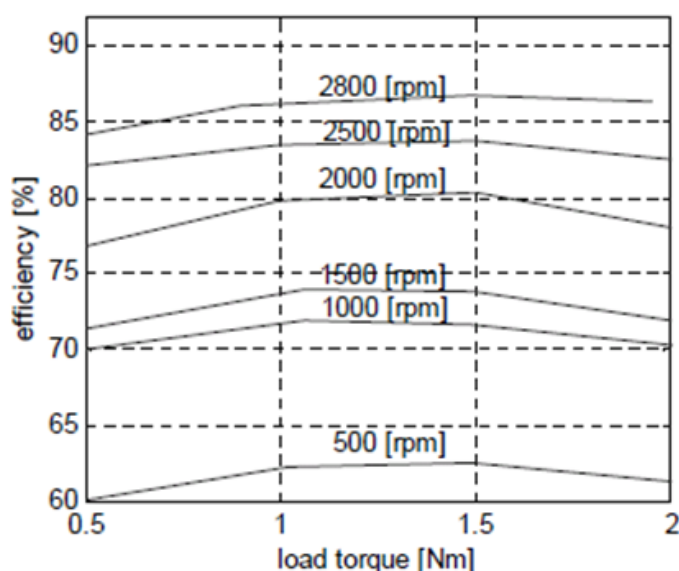
Figur 3.20 viser udviklingen i virkningsgraden for en 25 watts permanent magnet synkronmaskine. I udformning ligner udviklingen meget lig BLDC maskinen, idet virkningsgraden holder sig pænt oppe over hele omdrejningstal området, men falder med faldende belastningsmoment. Det forventes, at udviklingen vil være den samme, når der er tale om en fremmedmagnetiseret synkronmaskine, men her vil der være ekstra ohmsk tab i magnetiseringsviklingen på rotoren.



Figur 3.20. Kurve med overflade, der viser udviklingen i virkningsgrad for en 25 W 2 polet permanent magnet synkron maskine som funktion af omdrejningstal og moment

2.4.4 Switchede reluktansmaskinen

Udviklingen i virkningsgrad for en prototype switchede reluktansmotor vises i **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet..** Her kan ses, at virkningsgraden holde sig pænt høj ved ændringer i momentet, men at virkningsgraden falder som funktion af dalende omdrejningstal. Det er meget lig udviklingen i virkningsgrad for asynkronmaskinen.



Figur 3.21. Målte virkningsgrader for en switchede reluktansmotor ved forskellige omdrejningstal.

2.5 Holdbarhed og svage punkter

Elektriske maskiner er generelt meget pålidelige, men der kan være aspekter ved alle typer maskiner, der fremtræder som svagheder. Disse svagheder forklares i den følgende tekst.

Fælles for alle maskintyper er, at de viklinger i de elektriske maskiner, der er strømførende kommer fra en frekvensomformer, som kan være udsat for kortvarigt overspændinger, hvilket i længden kan forkorte viklingens levetid. Nogle fabrikanten forstærker deres viklinger for at modvirke denne effekt. En anden effekt, der hænder ifm. Anvendelse af effektelektronik er, at der kan forekomme strøm i lejerne, og dette ødelægger de rullende elementer og kørebanerne.

2.5.1 Asynkronmaskinen

Kortslutnings asynkronmaskinen er en meget stærk konstruktion. Den er forsynet med en isoleret vikling på statoren, der er udsat for få eksterne påvirkninger. Det, der kan svække maskinen, kan være eksterne overspændinger eller gentagne blokeringer af akslen.

Rotoren er forsynet med en uisoleret, kortsluttet vikling, der påvirkes af blokeringsstrøm og vibrationer.

I almindelige applikationer er kortslutnings asynkronmotoren meget pålidelig. Når først den er korrekt tilpasset applikationen, kan den fungere med meget lidt vedligeholdelsesarbejde i mange år.

Anderledes er det med slæberings asynkronmaskinen. Her anbringes en isolerede vikling på rotoren. Der føres strøm fra stator til rotor over kombinationen af kul og slæbering. Herved opstår der slid ved strømovertørrslen på både kul og slæbering. Det aflejrer ledende støv over hele maskinen. Støvet er slibende i natur og kan derfor ødelægge isolationen på viklingerne og især på rotoren, hvor det kombineres med vibrationer. Selve sliddet medfører, at der skal udføres vedligeholdelsesarbejde jævnlgt, da kul og slæberinge skal kontrolleres og evt. skiftes.

Generelt må man sige, at slæberings asynkronmaskinen er mere sart end kortslutnings asynkronmaskinen, kræver meget mere vedligeholdelse og er knap så pålidelig.

2.5.2 DC maskinen

Hvis DC maskinen er den traditionelle konstruktion med kul og kommutator, så er situationen lig den for slæberings asynkronmaskinen. Den er faktisk værre, da der opstår flere gnister på kommutatoren end på slæberingerne, fordi strømmens retning skal skiftes. Støvet kan også komme til at lægge sig imellem kommutatorlamellerne og derved danne ødelæggende kortslutninger. Derfor kan der anbringes en isolerede vikling på rotoren, og der føres strøm fra stator til rotor over kul/ kommutator kombinationen. Desuden opstår der slid på både kul og kommutator ved strømovertørrslen, hvilket aflejrer ledende støv over hele maskinen. Støvet er slibende af natur og kan derfor ødelægge isolationen på viklingerne, især på rotoren, hvor det kombineres med vibration. Selve sliddet medfører, at der skal udføres vedligeholdelsesarbejde jævnlgt, da kul og slæberinger skal kontrolleres og evt. skiftes.

Anderledes ser det ud med børsteløse DC motorer. Her er ankerviklingen anbragt på statoren, og kommuteringen foretages vha. effektelektronik, der nu til dags er meget pålidelig. Der er ingen gnister eller slid. Magneterne anbringes på rotoren, og til dette er ferritmagneter meget pålidelige, hvis de anvendes indenfor det specificerede temperaturområde. NdFeB magneter er meget stærke og anbefales til motorbrug, men de er udsat for korrosion og skal beskyttes med en overfladebehandling. Permanente magnetmaterialer er generelt skøre, og danner nemt revner ved fysiske påvirkninger såsom slag og vibrationer.

2.5.3 Synkronmaskinen

En strømmagnetiseret synkronmaskine har en vikling anbragt på rotoren, og DC strøm føres til denne vikling vha. kul og slæberinge. Herved opstår der ved strømovertørrslen slid på både kul og slæberinge, Og det aflejrer ledende støv over hele maskinen. Støvet er slibende af natur og kan derfor ødelægge isolationen på viklingerne, især på rotoren, hvor det kombineres med vibration. Selve sliddet medfører, at der skal udføres vedligeholdelsesarbejde jævnlgt, da kul og slæberinge skal kontrolleres og evt. skiftes.

Anderledes er det tilfældet med permanent magnet synkronmotorer. Her er ankerviklingen anbragt på statoren, og synkronisering foretages vha. effektelektronik, som nu til dags er meget pålidelig, og der er ingen gnister eller slid. Magneterne anbringes på rotoren, ferritmagneter meget pålidelige til dette formål, hvis de anvendes indenfor det specificerede temperaturområde. NdFeB magneter er meget stærke og anbefales til motorbrug, men de er udsat for korrosion og skal beskyttes med en overfladebehandling. Generelt er permanente magnetmaterialer skøre og danner nemt revner ved fysiske påvirkninger såsom slag og vibrationer.

Permanent magnet synkronmaskiner har en tendens til at svinge voldsomt, og de kan være ustabile. Derfor er det påkrævet, at denne maskintype altid er styret for at stabilisere den.

2.5.4 Switchede reluktansmaskinen

Den switchede reluktansmaskine er en meget stærk konstruktion. Statoren er forsynet med en isoleret vikling, der er udsat for få eksterne påvirkninger. Af svækkende hændelser kan der evt. være tale om eksterne overspændinger eller gentagne blokeringer af akslen.

Rotoren er forsynet med udprægede poler uden nogen form for vikling.

I almindelige applikationer er den switchede reluktansmaskine meget pålidelig. Når maskinen først er korrekt tilpasset applikationen, kan den fungere i mange år med meget lidt vedligeholdelsesarbejde.

Den svage punkt ved den switchede reluktansmaskine er, at den er tilbøjelige til at støje.

2.6 Geometrisk udformning og integration med applikationen

Den almindelige udformning af en elektrisk maskine er, at statoren udgør en hul cylinder, mens rotoren udgør en massiv cylinder, der drejer i statoren. Begge dele fabrikeres med en kerne af ferromagnetisk materiale og en vikling, der bærer strøm. I visse maskintyper erstattes den ene vikling af permanent magneter, og i andre maskintyper kan den ene vikling udelades helt.

Maskiner leveres normalt med indkapsling og fod eller flange til montage på belastningsmaskinen. I særlige tilfælde kan maskinen dog leveres i form af en stator-rotor enhed til indbygning i kundens maskine. Det kan betyde en lettere, mere kompakt arbejdsmaskine.

2.7 Regulerbarhed og nødvendig styringsudrustning

Samtlige typer af elektriske maskine kan reguleres vha. effektelektroniske konverterer, men nogle maskintyper kan slet ikke fungere uden en effektelektronisk konverter.

2.7.1 Asynkronmaskinen

Frekvensomformerer startede med at være en måde at regulere hastigheden på en kortslutnings asynkronmaskine. Det siger sig selv, at asynkronmaskinen evt. kan reguleres vha. en frekvensomformer. Det er dog ikke nødvendigt. Asynkronmaskinen kan også bruges

uden nogen form for regulering. Da startstrømmen er ca. 6 ggr. fuldlaststrømmen, kan det i større maskiner være ønskeligt at anvende en soft-start enhed, der begrænser både startstrøm og startmoment.

2.7.2 DC maskinen

Den traditionelle DC maskine med kommutator har gennem årene været meget efterspurgt, da den kunne reguleres uden brug af effektelektronik. Den er stadig efterspurgt af samme årsag, men nu også fordi den kan reguleres vha. effektelektronik. Det kan dog være stadig vanskeligere at finde en fabrikant, der fremstiller kommutatormaskiner i industriel størrelse, pga. det slid, der opstår på kul og kommutator. Der fremstilles dog mange kommutator maskiner i sub-kW størrelser til husholdningsbrug, hånd værktøj og andre små maskiner.

I takt med forbedringer i de permanente magnetmaterialer, effektelektronikken og styringselektronikken er den børsteløse permanente magnet DC motor ved at overtage markedet. Den kan ikke fungere uden styringsudrustning, men sidstnævnte er ved at falde til et konkurrencedygtigt prisleje.

2.7.3 Synkronmaskinen

Traditionelt set har man anvendt synkronmaskinen til at kompensere for en dårlig effektfaktor ved at justere for magnetiseringsstrømmen, når den er tilsluttet forsyningsnettet. Dette kan nu styres vha. effektelektronik.

Desuden kan synkronmaskinens omdrejningstal og moment styres vha. en frekvensomformer. Dette gælder både for strømmagnetiseret og permanent magnet synkronmaskiner.

Den strømmagnetiserede synkronmaskine kan evt. fungere uden nogen form for automatisk reguleringsenhed. Det gælder dog ikke for den permanent magnet synkronmaskine. Generelt skal den styres, hvis man skal opnå en stabil funktion.

2.7.4 Switchede reluktansmaskinen

Den switchede reluktansmaskine kan slet ikke fungere uden en speciel styring, der ikke kan anvendes til andre motortyper.

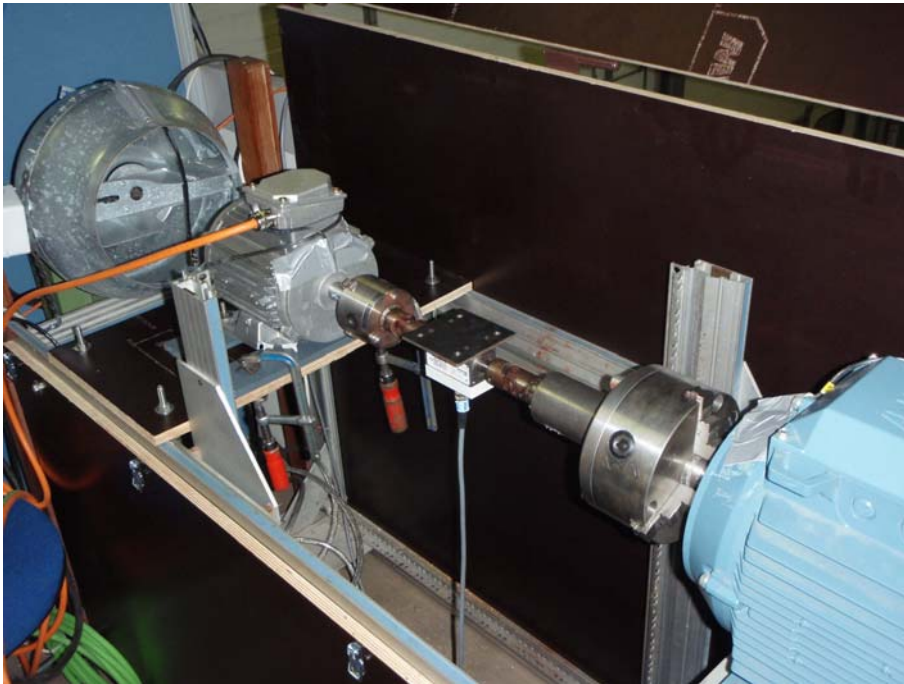
2.8 Opsummering og konklusion

Der er kort beskrevet adskillige typer roterende elektriske maskiner. Formålet har været at gøre det nemmere for ingeniører at sætte sig ind i maskinernes virkemåde, selvom de ikke er specialister i elektriske maskiner. Det drejer sig om såvel traditionelle elektriske maskiner som de maskintyper, der først er blevet anvendelige, da der har kunnet anvendes styring vha. computere og effektelektronik.

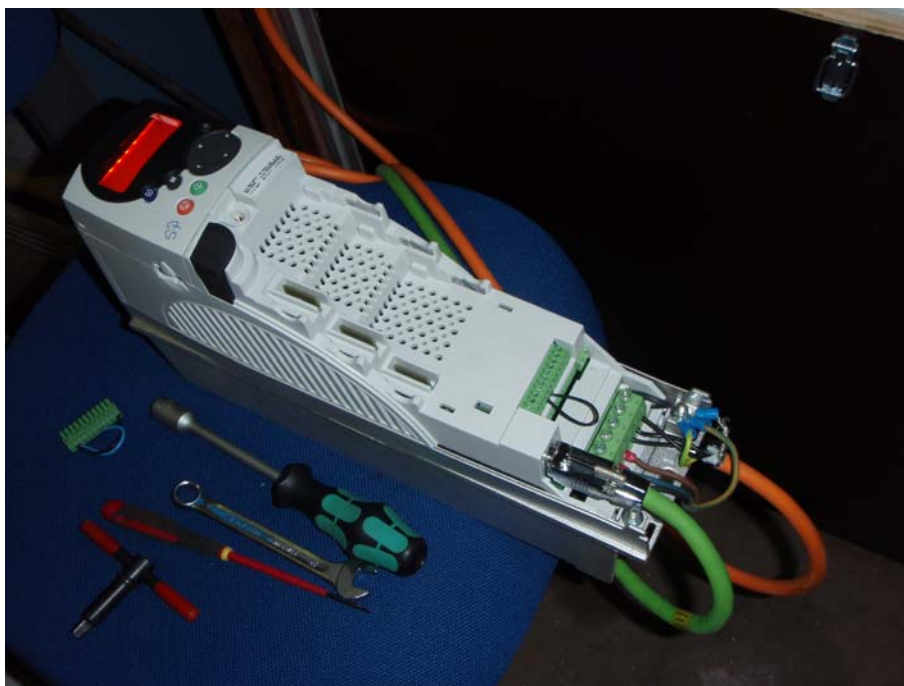
3 Test af motorer i momentbænk

3.1 Test af lille asynkronmotor og PM motor

3.1.1 Test af 2,2 kW asynkronmotor

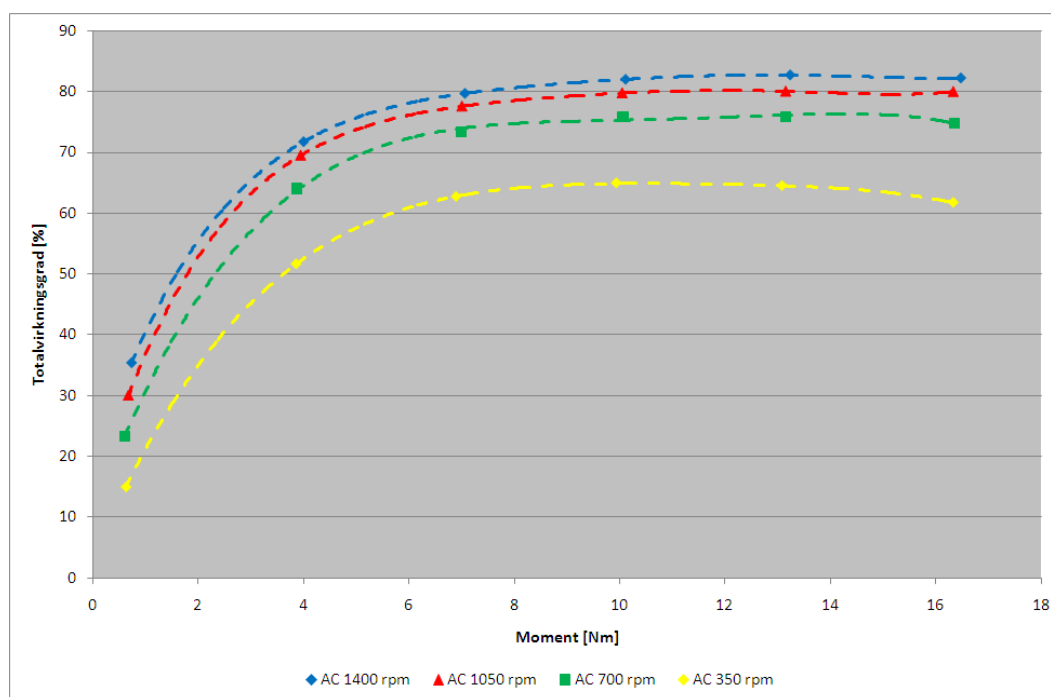


Figur 3.1. Måleopstilling (2,4 kW PM motor, momentmåler og generator).



Figur 3.2. Frekvensomformer til 2,4 kW PM motor.

I figur 3.3 ses totalvirkningsgrader for en 2,2 kW asynkronmotor og frekvensomformer som funktion af momentet. Virkningsgraderne er vist ved fire forskellige omdrejningstal.



Figur 3.3. Totalvirkningsgrader for 2,2 kW asynkronmotor og frekvensomformer som funktion af momentet.

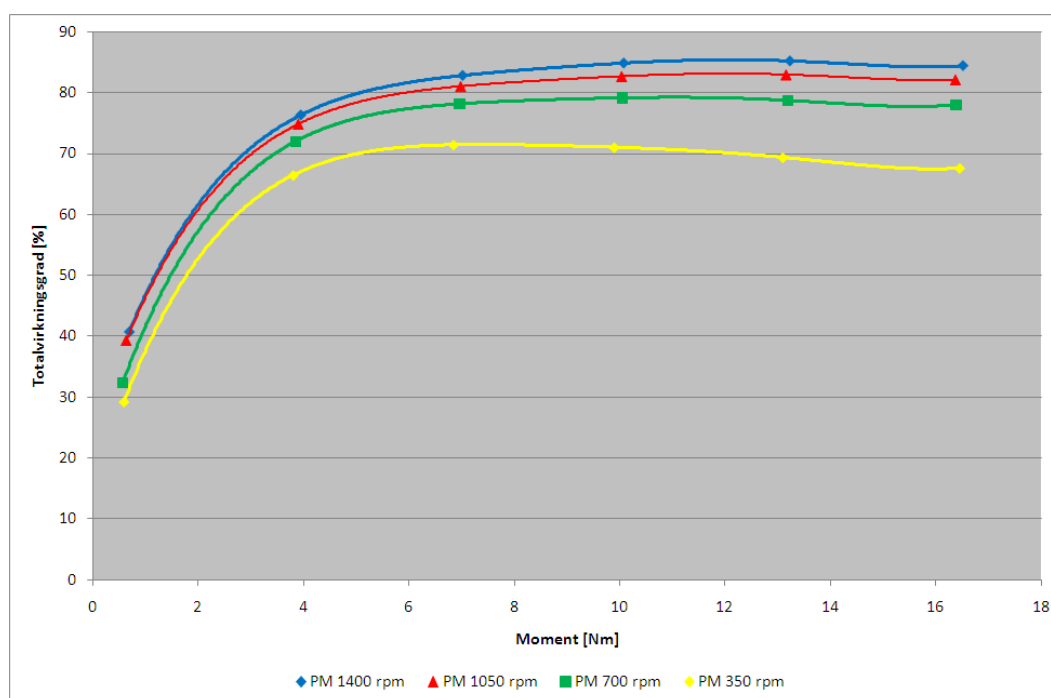
Ved 50 Hz (nominelt omløbstal, 1.400 o/min) ses det, at totalvirkningsgraden stort set er konstant ved momenter mellem 10 og 17 Nm (nominelt moment er 15 Nm). Ved momenter lavere end 10 Nm sker der fald i virkningsgraden. Momentet skal dog under 4 Nm, før virkningsgraden for alvor begynder at falde.

Ved 37,5 Hz (1.050 o/min) ses det igen, at totalvirkningsgraden stort set er konstant ved momenter mellem 10 og 17 Nm. Ved momenter lavere end 10 Nm sker der fald i virkningsgraden. Momentet skal dog under 4 Nm, før virkningsgraden for alvor begynder at falde. Totalvirkningsgraderne er ved de 37,5 Hz ca. 3 % lavere end totalvirkningsgraderne ved 50 Hz.

Ved 25 Hz og 12,5 Hz (700 o/min og 350 o/min) er billederne stort set de samme, som beskrevet ovenfor. Totalvirkningsgraderne er ved de 25 Hz ca. 7 % lavere end virkningsgraderne ved 50 Hz, mens de ved de 12,5 Hz er ca. 18 % lavere end virkningsgraderne ved 50 Hz.

3.1.2 Test af 2,4 kW PM motor

I figur 3.4 ses totalvirkningsgrader for en 2,4 kW PM motor og frekvensomformerer som funktion af momentet. Virkningsgraderne er vist ved fire forskellige omdrejningstal.



Figur 3.4. Totalvirkningsgrader for 2,4 kW PM motor og frekvensomformerer som funktion af momentet.

Ved 50 Hz (nominelt omløbstal, 1.400 o/min) ses det, at totalvirkningsgraden stort set er konstant ved momenter mellem 8 og 17 Nm (nominelt moment er 16,4 Nm). Ved momenter lavere end 8 Nm sker der fald i virkningsgraden. Momentet skal dog under 4 Nm, før virkningsgraden for alvor begynder at falde.

Ved 37,5 Hz (1.050 o/min) ses det igen, at totalvirkningsgraden stort set er konstant ved momenter mellem 8 og 17 Nm.

Ved momenter lavere end 8 Nm sker der fald i virkningsgraden. Momentet skal dog igen under 4 Nm, før virkningsgraden for alvor begynder at falde.

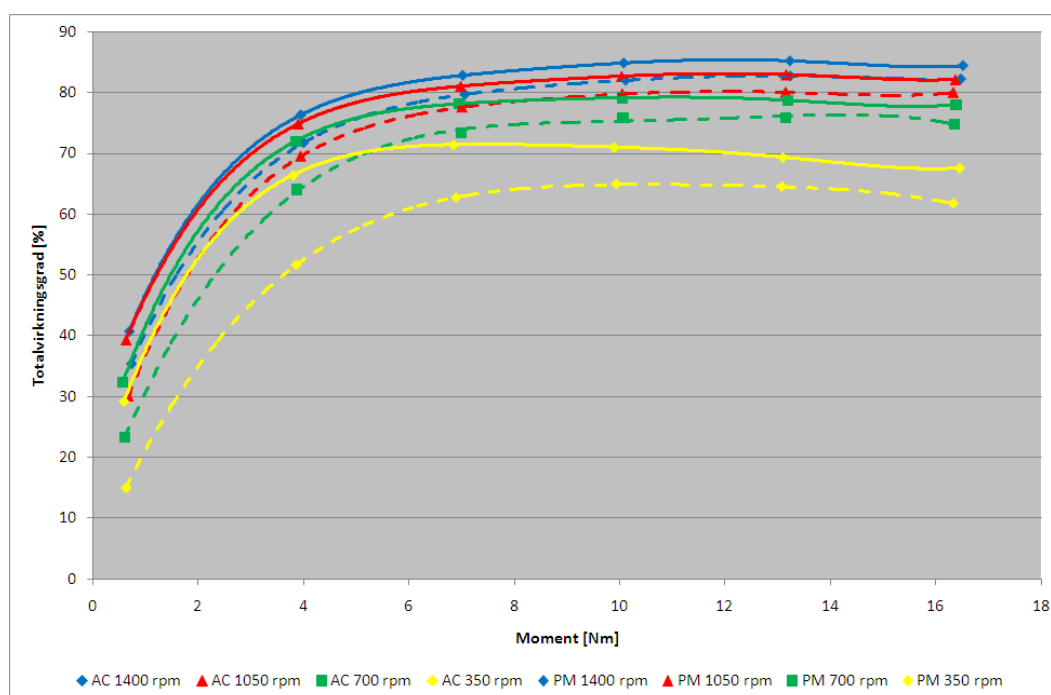
Totalvirkningsgraderne er ved de 37,5 Hz ca. 2 % lavere end totalvirkningsgraderne ved 50 Hz.

Ved 25 Hz og 12,5 Hz (700 o/min og 350 o/min) er billederne stort set de samme, som beskrevet ovenfor.

Totalvirkningsgraderne er ved de 25 Hz ca. 6 - 8 % lavere end virkningsgraderne ved 50 Hz, mens de ved de 12,5 Hz er ca. 12 - 18 % lavere end virkningsgraderne ved 50 Hz. De største forskelle ses ved de høje momenter.

3.1.3 Sammenligning

I figur 3.5 ses totalvirkningsgrader for en 2,2 kW asynkronmotor og frekvensomformer samt en 2,4 kW PM motor og frekvensomformer som funktion af momentet. Virkningsgraderne er vist ved fire forskellige omdrejningstal.



Figur 3.5. Virkningsgraderer for 2,2 kW asynkronmotor og frekvensomformer samt 2,4 kW PM motor og frekvensomformer som funktion af momentet.

Ved 50 Hz (nominelt omløbstal, 1.400 o/min) ses det, at forskellen i totalvirkningsgraderne er 2 - 3 % i området mellem 8 og 17 Nm.

Ved momenter lavere end 8 Nm bliver forskellen i virkningsgraderne større. Ved 1 Nm er forskellen 5 – 6 %.

Ved 37,5 Hz og 25 Hz (1.050 o/min og 700 o/min) er billedet stort set de samme, som beskrevet ovenfor.

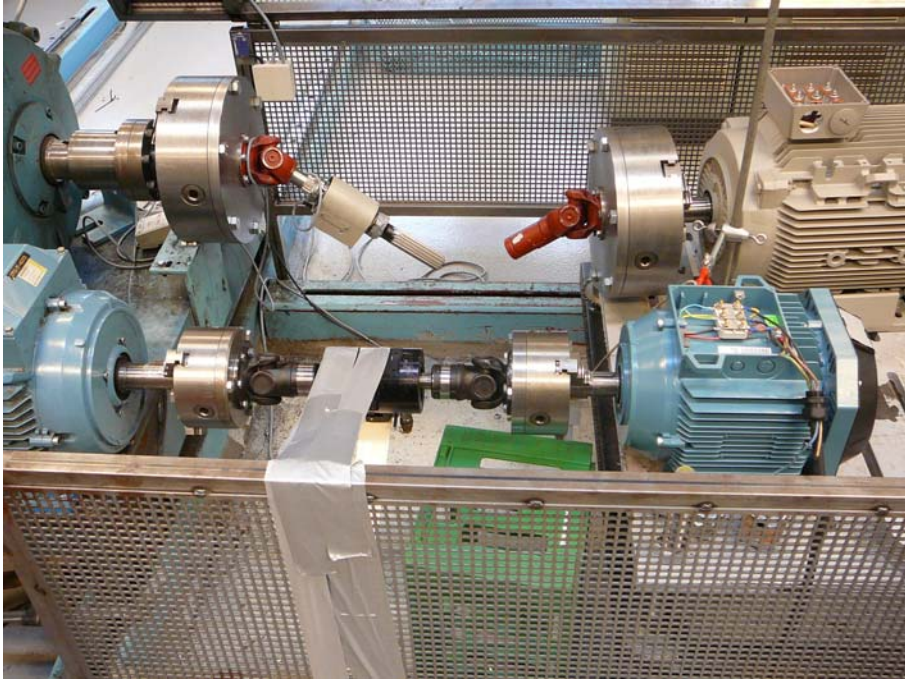
Ved momenter lavere end 8 Nm bliver forskellen i virkningsgraderne igen større. Ved 1 Nm er forskellen, ved begge omdrejningstal, ca. 10 %.

Ved 12,5 Hz (350 o/min) ses det, at forskellen i totalvirkningsgraderne er 6 - 7 % i området mellem 8 og 17 Nm.

Ved momenter lavere end 8 Nm bliver forskellen i virkningsgraderne større. Ved 1 Nm er forskellen ca. 15 %.

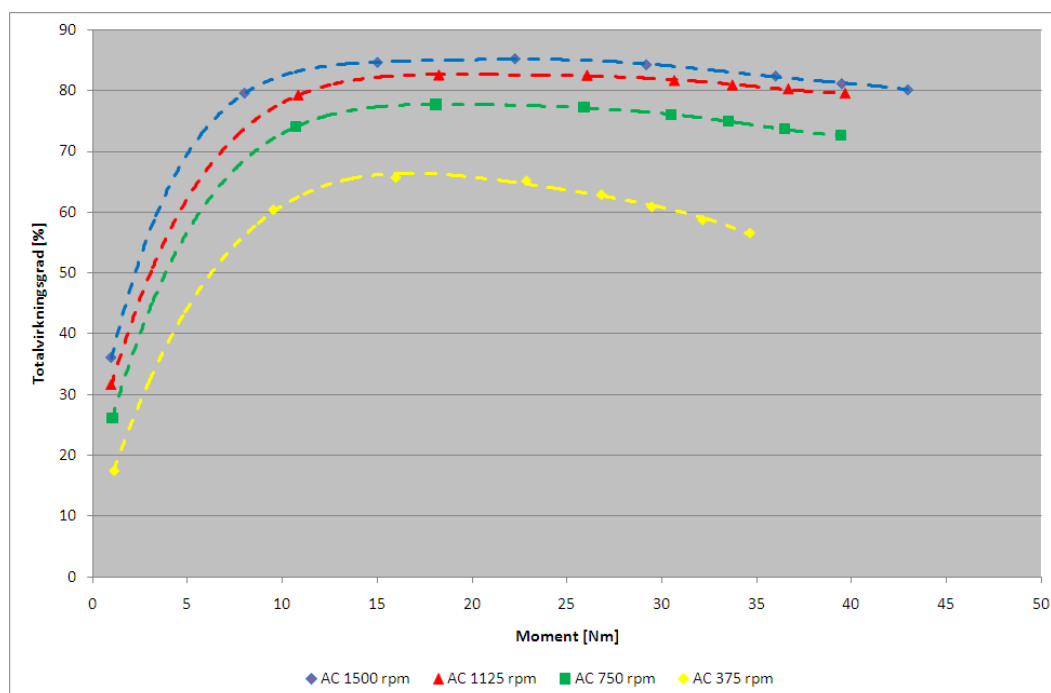
3.2 Test af mellemstor asynkronmotor og PM motor

3.2.1 Test af 5,5 kW asynkronmotor



Figur 3.6. Måleopstilling (5,5 kW asynkronmotor, momentmåler og generator).

I figur 3.7 ses totalvirkningsgrader for en 5,5 kW asynkronmotor og frekvensomformerer som funktion af momentet. Virkningsgraderne er vist ved fire forskellige omdrejningstal.



Figur 3.7. Totalvirkningsgrader for 5,5 kW asynkronmotor og frekvensomformerer som funktion af momentet.

Ved 50 Hz (nominelt omløbstal, 1.500 o/min) ses det, at totalvirkningsgraden stiger fra 80 % ved ca. 43 Nm til 85 % ved ca. 22 Nm (nominelt moment er 35 Nm). Herefter falder virkningsgraden fra de 85 % til 80 % ved ca. 8 Nm.

Når momentet kommer under de 8 Nm, begynder virkningsgraden for alvor at falde.

Ved 37,5 Hz ses det, at totalvirkningsgraden stiger fra 79 % ved ca. 40 Nm til 82 % ved ca. 22 Nm. Herefter falder virkningsgraden fra de 82 % til ca. 78 % ved ca. 11 Nm.

Når momentet kommer under de 11 Nm, begynder virkningsgraden for alvor at falde.

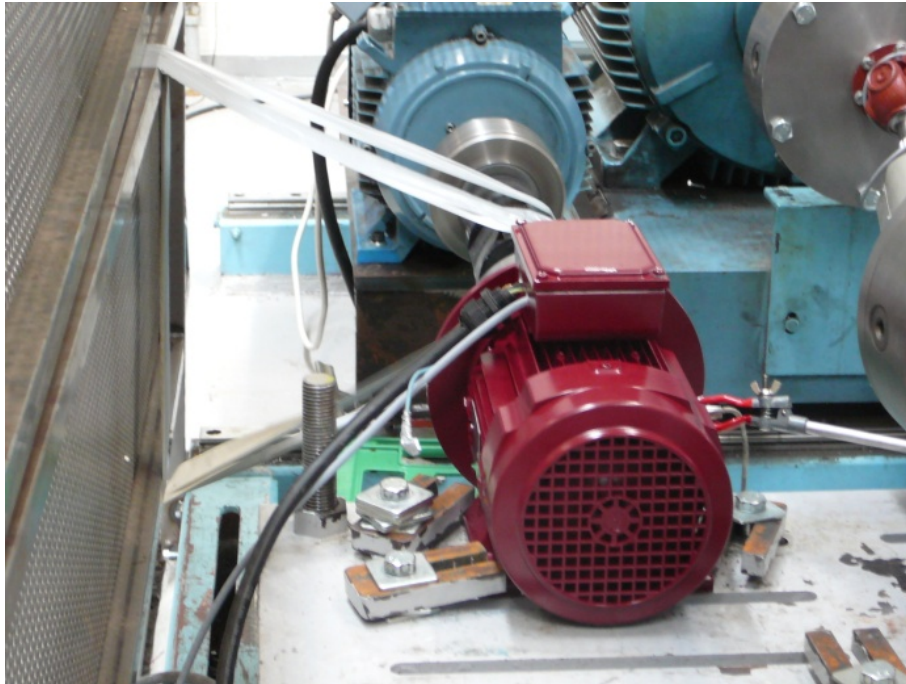
Ved 25 Hz ses det, at totalvirkningsgraden stiger fra 72 % ved ca. 40 Nm til 78 % ved ca. 22 Nm. Herefter falder virkningsgraden fra de 78 % til ca. 74 % ved ca. 11 Nm.

Herefter falder virkningsgraden fra de 74 % til 70 % ved ca. 8 Nm. Når momentet kommer under de 8 Nm, begynder virkningsgraden for alvor at falde.

Ved 12,5 Hz ses det, at totalvirkningsgraden stiger fra 56 % ved ca. 35 Nm til 66 % ved ca. 16 Nm. Herefter falder virkningsgraden fra de 66 % til ca. 60 % ved ca. 9 Nm.

Når momentet kommer under de 9 Nm, begynder virkningsgraden for alvor at falde.

3.2.2 Test af 5,2 kW PM motor

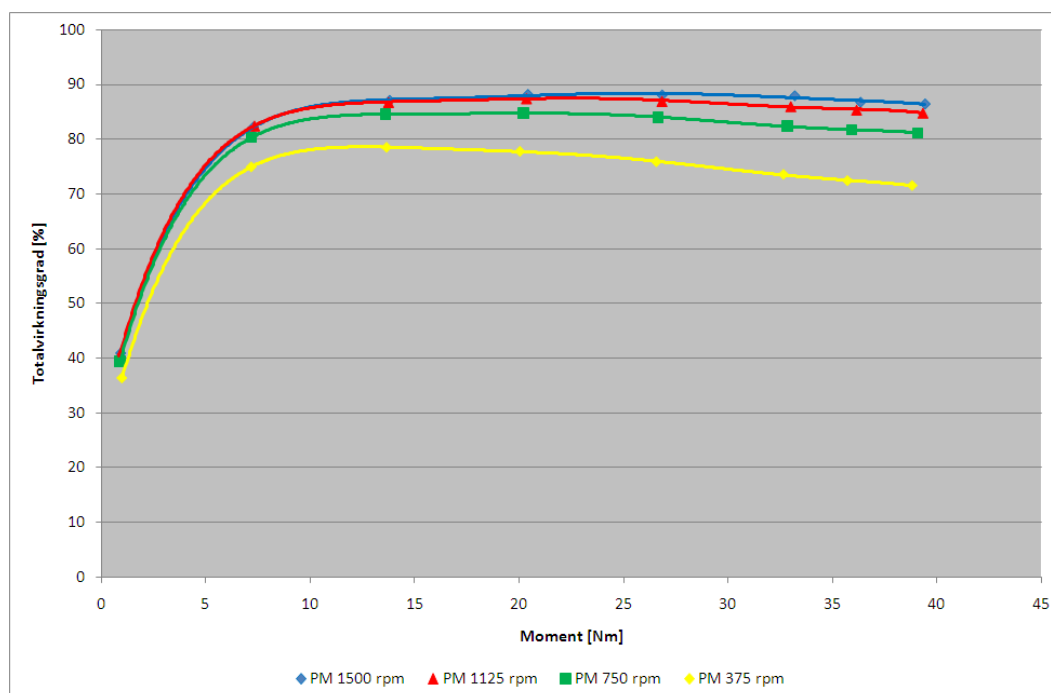


Figur 3.8. Måleopstilling (5,2 kW PM motor, momentmåler og generator).



Figur 3.9. Frekvensomformer til 5,2 kW PM motor.

I figur 3.10 ses totalvirkningsgrader for en 5,2 kW PM motor og frekvensomformer som funktion af momentet. Virkningsgraderne er vist ved fire forskellige omdrejningstal.



Figur 3.10. Totalvirkningsgrader for 5,2 kW PM motor og frekvensomformer som funktion af momentet.

Ved 50 Hz (nominelt omløbstal, 1.500 o/min) ses det, at totalvirkningsgraden stort set er konstant ved momenter mellem 14 og 40 Nm (nominelt moment er 31,8 Nm). Mellem ca. 33 Nm og 40 Nm falder virkningsgraden dog ca. 2 %.

Ved momenter lavere end 14 Nm sker der fald i virkningsgraden. Momentet skal dog under 8 Nm, før virkningsgraden for alvor begynder at falde.

Ved 37,5 Hz (1.050 o/min) ses det igen, at totalvirkningsgraden stort set er konstant ved momenter mellem 14 og 40 Nm.

Ved momenter lavere end 8 Nm sker der fald i virkningsgraden. Momentet skal dog igen under 4 Nm, før virkningsgraden for alvor begynder at falde.

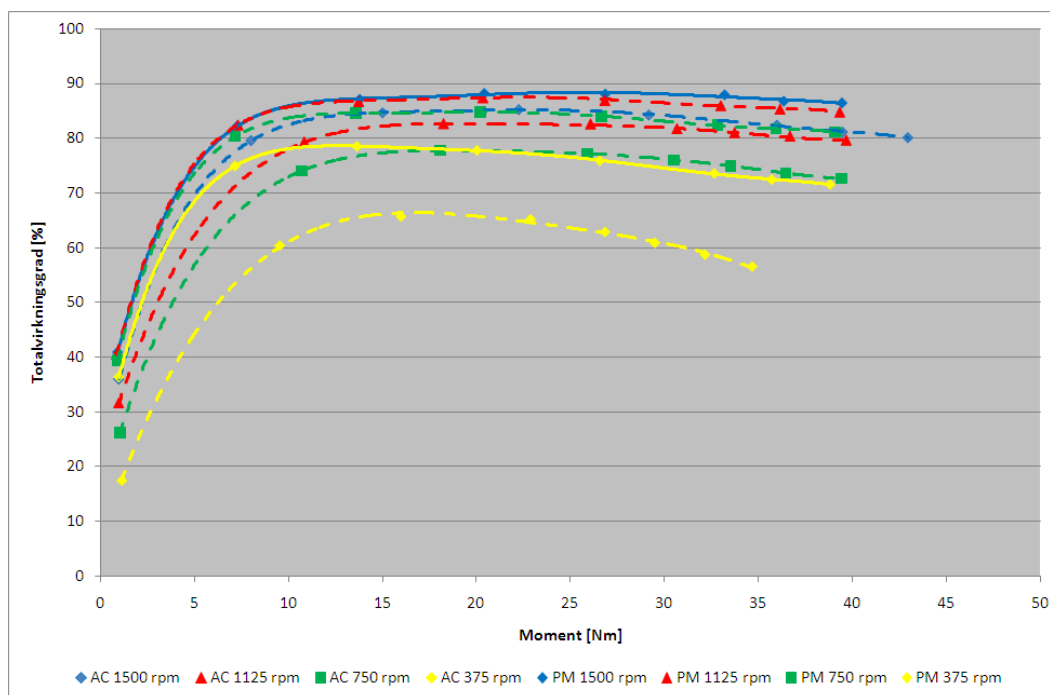
Totalvirkningsgraderne er ved de 37,5 Hz ca. 1 - 2 % lavere end totalvirkningsgraderne ved 50 Hz. Ved momenter lavere end 14 Nm, er virkningsgraderne dog stort set ens.

Ved 25 Hz og 12,5 Hz (700 o/min og 350 o/min) er billederne anderledes. Hér falder virkningsgraderne i henholdsvis 5 og 8 % ved momenter mellem 14 og 40 Nm.

Totalvirkningsgraderne er ved de 25 Hz ca. 3 - 6 % lavere end virkningsgraderne ved 50 Hz, mens de ved de 12,5 Hz er ca. 10 - 15 % lavere end virkningsgraderne ved 50 Hz. De største forskelle ses ved de høje momenter.

3.2.3 Sammenligning

I figur 3.11 ses totalvirkningsgrader for en 5,5 kW asynkronmotor og frekvensomformer samt en 5,2 kW PM motor og frekvensomformer som funktion af momentet. Virkningsgraderne er vist ved fire forskellige omdrejningstal.



Figur 3.11. Virkningsgraderer for 5,5 kW asynkronmotor og frekvensomformer samt 5,2 kW PM motor og frekvensomformer som funktion af momentet.

Ved 50 Hz (nominelt omløbstal, 1.500 o/min) ses det, at forskellen i totalvirkningsgraderne er 3 - 5 % i området mellem 1 og 40 Nm. Den største forskel ses ved de høje momenter.

Ved 37,5 Hz (1.050 o/min) ses det, at forskellen i totalvirkningsgraderne er 5 - 6 % i området mellem 11 og 40 Nm.

Ved momenter lavere end 11 Nm bliver forskellen i virkningsgraderne større. Ved 1 Nm er forskellen ca. 10 %.

Ved 25 Hz (700 o/min) ses det, at forskellen i totalvirkningsgraderne er 8 - 9 % i området mellem 11 og 40 Nm.

Ved momenter lavere end 11 Nm bliver forskellen i virkningsgraderne igen større. Ved 1 Nm er forskellen, ved begge omdrejningstal, ca. 14 %.

Ved 12,5 Hz (350 o/min) ses det, at forskellen i totalvirkningsgraderne er 12 - 14 % i området mellem 10 og 35 Nm.

Ved momenter lavere end 10 Nm bliver forskellen i virkningsgraderne større. Ved 1 Nm er forskellen ca. 18 %.

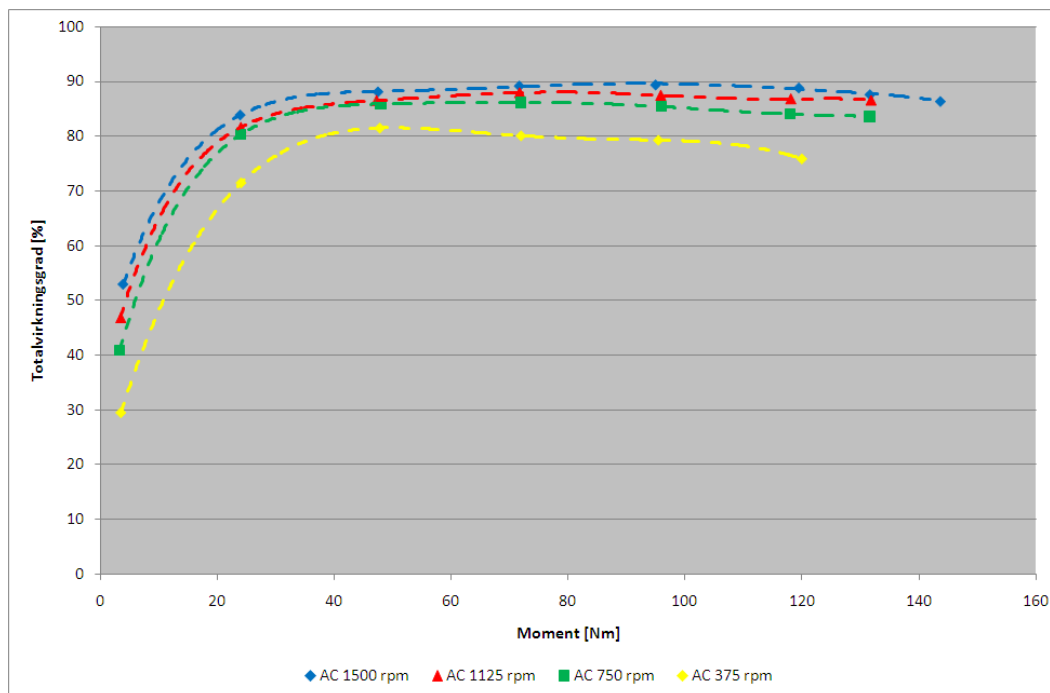
3.3 Test af stor asynkronmotor og PM motor

3.3.1 Test af 18,5 kW asynkronmotor



Figur 3.12. Måleopstilling (18,5 kW asynkronmotor, momentmåler og generator).

I figur 3.13 ses totalvirkningsgrader for en 18,5 kW asynkronmotor og frekvensomformer som funktion af momentet. Virkningsgraderne er vist ved fire forskellige omdrejningstal.



Figur 3.13. Totalvirkningsgrader for 18,5 kW asynkronmotor og frekvensomformer som funktion af momentet.

Ved 50 Hz (nominelt omløbstal, 1.500 o/min) ses det, at totalvirkningsgraden stiger fra ca. 86 % ved ca. 145 Nm til ca. 90 % ved ca. 90 Nm (nominelt moment er 119,5 Nm). Indtil ca. 70 Nm ligger virkningsgraden på de ca. 90 %, hvorefter den langsomt begynder at falde.

Når momentet kommer under 25 Nm, begynder virkningsgraden for alvor at falde.

Ved 37,5 Hz ses det, at totalvirkningsgraden stort set er konstant ved momenter mellem 75 og 130 Nm. Virkningsgraden ligger som det ses på 87 – 88 %.

Når momentet kommer under de 75 Nm begynder virkningsgraden at falde.

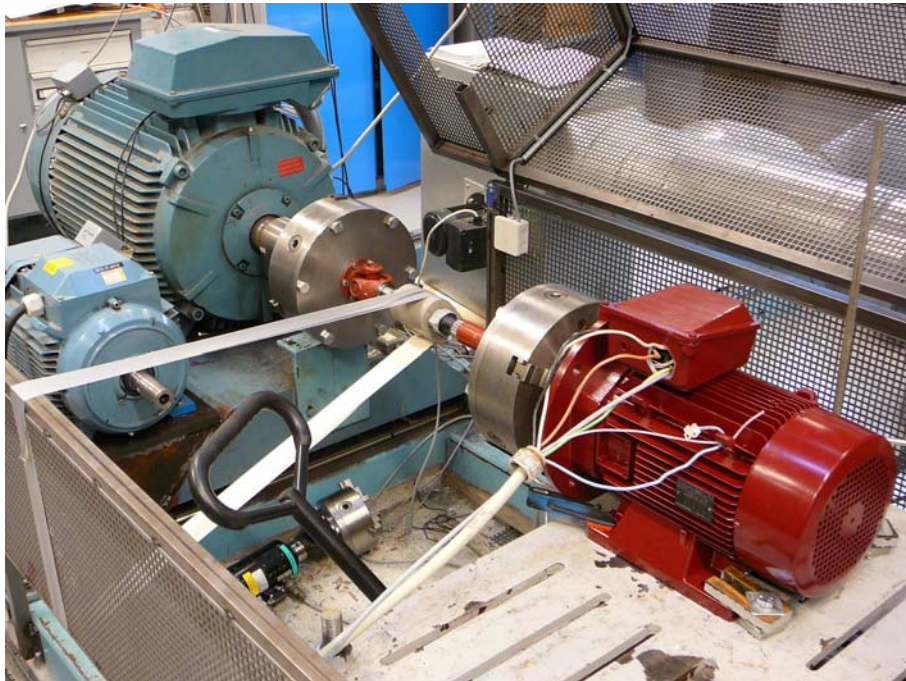
Momentet skal dog under 25 Nm, før virkningsgraden for alvor begynder at falde.

Ved 25 Hz ses det, at totalvirkningsgraden stiger fra 83 % ved ca. 130 Nm til 86 % ved ca. 75 Nm. Når momentet kommer under de 75 Nm begynder virkningsgraden at falde. Momentet skal dog igen under 25 Nm, før virkningsgraden for alvor begynder at falde.

Ved 25 Hz ses det, at totalvirkningsgraden stiger fra 76 % ved ca. 120 Nm til 81 % ved ca. 45 Nm. Når momentet kommer under de 45 Nm begynder virkningsgraden at falde relativt meget.

Momentet skal dog igen under 25 Nm, før virkningsgraden for alvor begynder at falde.

3.3.2 Test af 19,2 kW PM motor

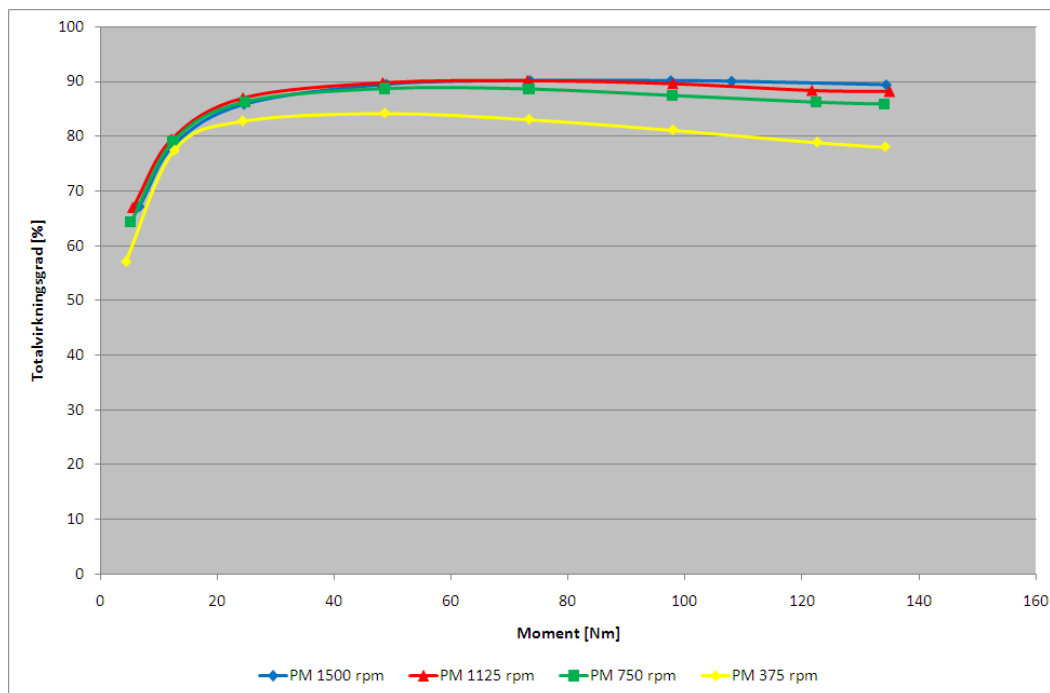


Figur 3.14. Måleopstilling (19,2 kW PM motor, momentmåler og generator).



Figur 3.15. Frekvensomformer til 19,2 kW PM motor.

I figur 3.16 ses totalvirkningsgrader for en 19,2 kW PM motor og frekvensomformer som funktion af momentet. Virkningsgraderne er vist ved fire forskellige omdrejningstal.



Figur 3.16. Totalvirkningsgrader for 19,2 kW PM motor og frekvensomformer som funktion af momentet.

Ved 50 Hz (nominelt omløbstal, 1.500 o/min) ses det, at totalvirkningsgraden stort set er konstant ved momenter mellem 50 og 135 Nm (nominelt moment er 122,3 Nm). Ved momenter lavere end 50 Nm sker der fald i virkningsgraden. Momentet skal dog under 25 Nm, før virkningsgraden for alvor begynder at falde.

Ved 37,5 Hz (1.125 o/min) ses det, at totalvirkningsgraden falder 1 - 2 % i området mellem 50 og 135 Nm.

Ved momenter lavere end 50 Nm sker der også fald i virkningsgraden. Momentet skal dog igen under 25 Nm, før virkningsgraden for alvor begynder at falde.

Totalvirkningsgraderne er ved de 37,5 Hz ca. 1 - 2 % lavere end totalvirkningsgraderne ved 50 Hz. Ved momenter lavere end 70 Nm, er virkningsgraderne dog stort set ens.

Ved 25 Hz (750 o/min) ses det, at totalvirkningsgraden falder 4 - 5 % i området mellem 50 og 135 Nm.

Ved momenter lavere end 50 Nm sker der også fald i virkningsgraden. Momentet skal dog igen under 25 Nm, før virkningsgraden for alvor begynder at falde.

Totalvirkningsgraderne er ved de 25 Hz ca. 2 - 5 % lavere end totalvirkningsgraderne ved 50 Hz. Ved momenter lavere end 50 Nm, er virkningsgraderne dog stort set ens.

Ved 12,5 Hz (750 o/min) ses det, at totalvirkningsgraden falder 5 - 6 % i området mellem 50 og 135 Nm.

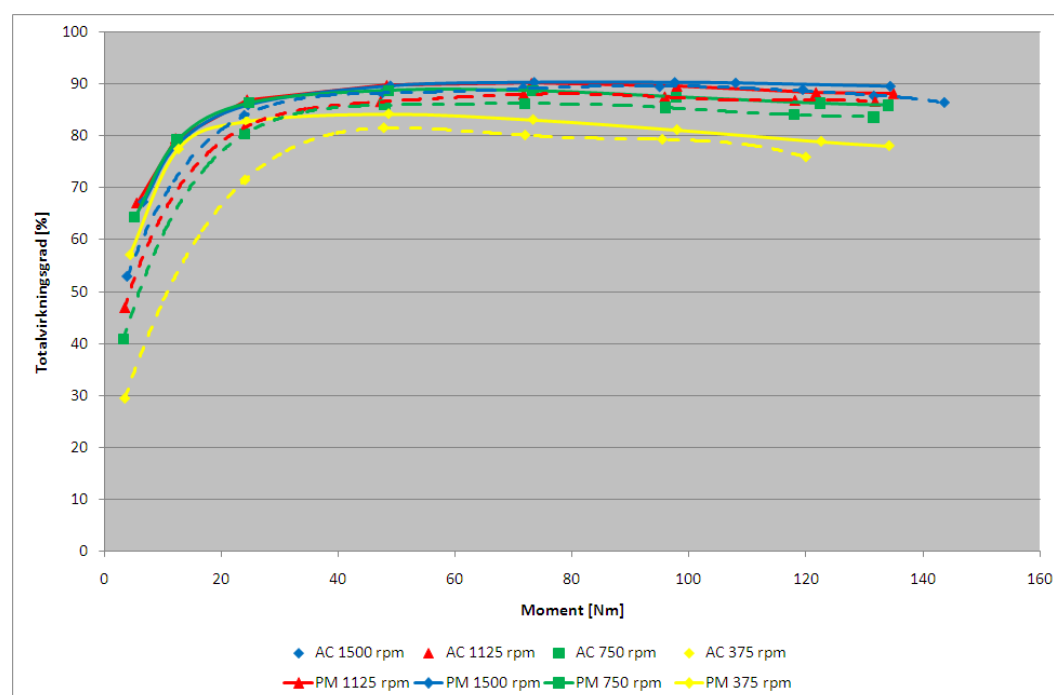
Ved momenter lavere end 50 Nm sker der også fald i virkningsgraden. Momentet skal dog igen under 25 Nm, før virkningsgraden for alvor begynder at falde.

Totalvirkningsgraderne er ved de 12,5 Hz ca. 3 - 12 % lavere end totalvirkningsgraderne ved 50 Hz. Den mindste forskel ses ved lave momenter.

3.3.3 Sammenligning

I figur 3.17 ses totalvirkningsgrader for en 18,5 kW asynkronmotor og frekvensomformer samt en 19,2 kW PM motor og frekvensomformer som funktion af momentet.

Virkningsgraderne er vist ved fire forskellige omdrejningstal.



Figur 3.17. Virkningsgrader for 18,5 kW asynkronmotor og frekvensomformer samt 19,2 kW PM motor og frekvensomformer som funktion af momentet.

Ved 50 Hz (nominelt omløbstal, 1.500 o/min) ses det, at forskellen i totalvirkningsgraderne er 1 - 2 % i området mellem 25 og 130 Nm.

Ved momenter lavere end 25 Nm bliver forskellen i virkningsgraderne større. Ved 5 Nm er forskellen 7 - 8 %.

Ved 37,5 Hz (1.125 o/min) ses det, at forskellen i totalvirkningsgraderne er 2 - 3 % i området mellem 60 og 130 Nm.

Ved momenter lavere end 60 Nm bliver forskellen i virkningsgraderne gradvist større. Ved 5 Nm er forskellen ca. 11 - 12 %.

Ved 25 Hz (750 o/min) ses det, at forskellen i totalvirkningsgraderne er 2 - 3 % i området mellem 60 og 130 Nm.

Ved momenter lavere end 60 Nm bliver forskellen i virkningsgraderne igen gradvist større.

Ved 5 Nm er forskellen, ved begge omdrejningstal, 23 - 24 %.

Ved 12,5 Hz (350 o/min) ses det, at forskellen i totalvirkningsgraderne er 3 - 4 % i området mellem 50 og 120 Nm.

Ved momenter lavere end 50 Nm bliver forskellen i virkningsgraderne gradvist større. Ved 5 Nm er forskellen 26 - 27 %.

3.4 Test af små asynkronmotorer og EC motorer



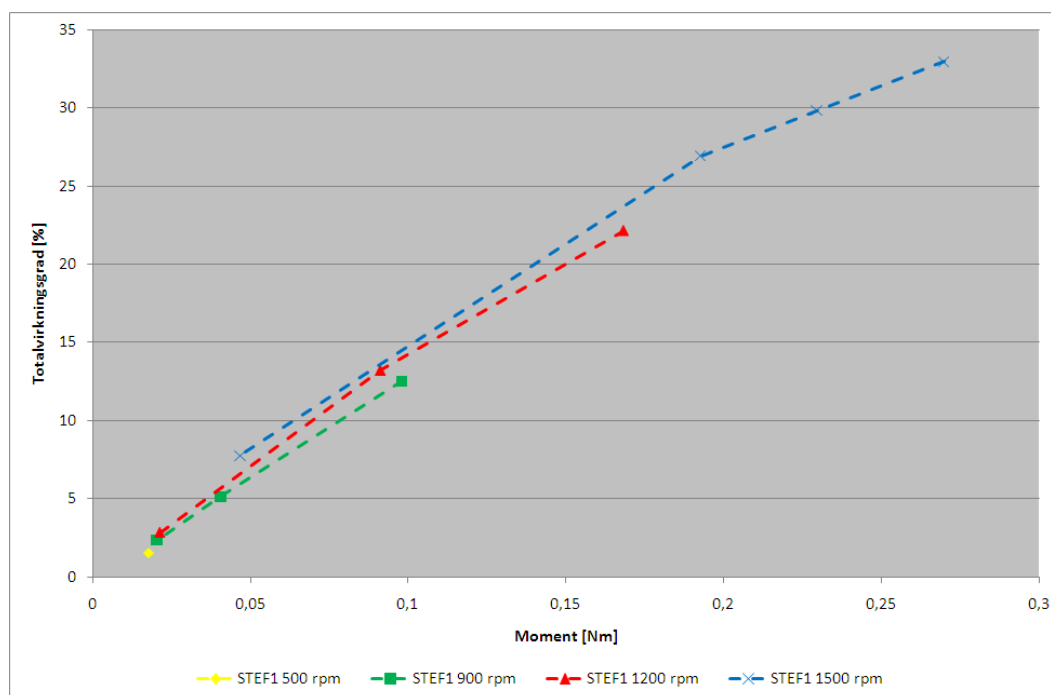
Figur 3.17. Måleopstilling (EC motor, momentmåler og generator).



Figur 3.18. EC motor fra Motron.

3.4.1 STEF 1

I figur 3.19 ses totalvirkningsgrader for en 0,04 kW asynkronmotor og frekvensomformer som funktion af momentet. Virkningsgraderne er vist ved fire forskellige omdrejningstal.



Figur 3.19. Totalvirkningsgrader for STEF 1 drev (motor og frekvensomformer) som funktion af momentet.

Ved 50 Hz (nominelt omløbstal, 1.500 o/min) ses det, at totalvirkningsgraden nærmest er lineær afhængig af momentet (nominelt moment er 0,27 Nm). Ved ca. 0,05 Nm er virkningsgraden ca.

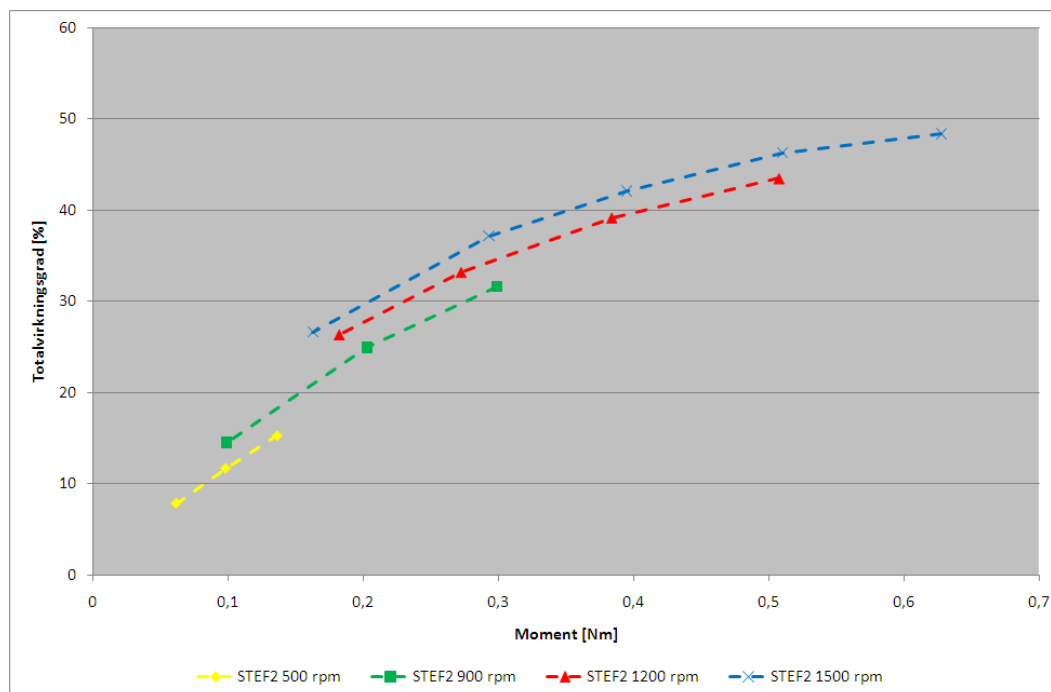
7,5 % mens den ved 0,27 Nm er ca. 33 %.

Ved 37,5 Hz, 25 Hz er billedet stort set det samme. Ved henholdsvis 37,5 Hz og 25 Hz er virkningsgraderne ca. 2 % og 5 % lavere end virkningsgraderne ved 50 Hz.

Ved 12,5 Hz har det kun været muligt at foretage en måling. Her var virkningsgraden ca. 1,5 % ved et moment på ca. 0,02 Nm.

3.4.2 STEF 2

I figur 3.20 ses totalvirkningsgrader for en 0,12 kW asynkronmotor og frekvensomformer som funktion af momentet. Virkningsgraderne er vist ved fire forskellige omdrejningstal.



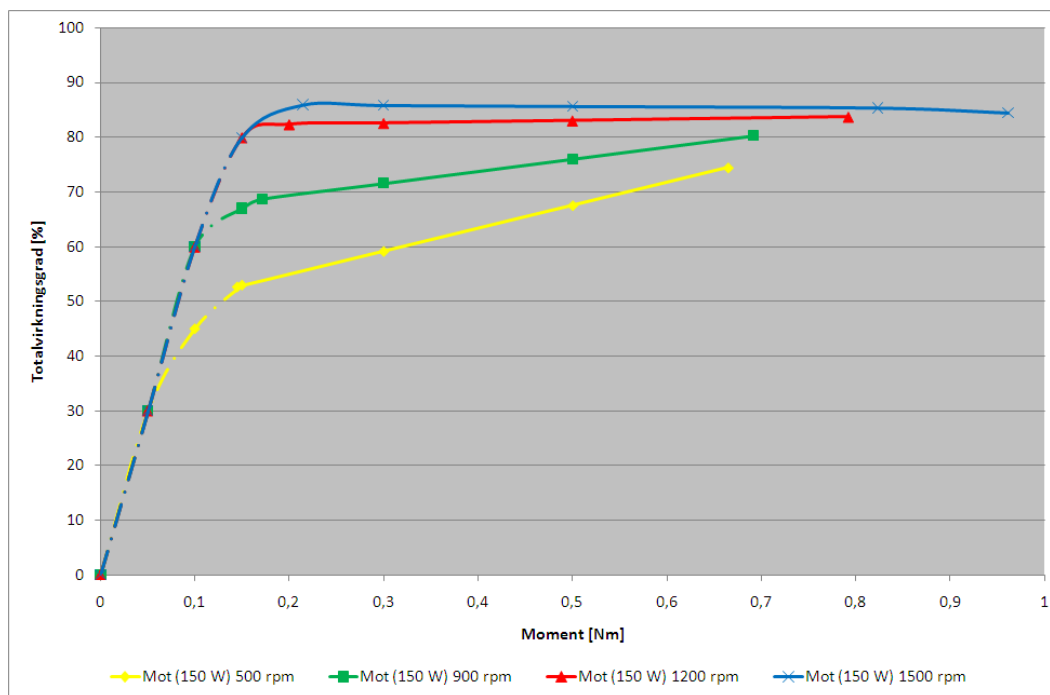
Figur 3.20. Totalvirkningsgrader for STEF 2 drev (motor og frekvensomformer) som funktion af momentet.

Ved 50 Hz (nominelt omløbstal, 1.500 o/min) ses det, at totalvirkningsgraden stiger med momentet i anden potens. (nominelt moment er 0,80 Nm). Ved ca. 0,17 Nm er virkningsgraden ca. 27 % mens den ved 0,63 Nm er ca. 48 %.

Ved 37,5 Hz, 25 Hz og 12,5 Hz er billedet stort set det samme. Ved henholdsvis 37,5 Hz, 25 Hz og 12,5 Hz er virkningsgraderne ca. 3 %, ca. 7 % og ca. 10 % lavere end virkningsgraderne ved 50 Hz.

3.4.3 Motron 150 W

I figur 3.21 ses totalvirkningsgrader for en 0,15 kW EC motor og frekvensomformer som funktion af momentet. Virkningsgraderne er vist ved fire forskellige omdrejningstal.



Figur 3.21. Totalvirkningsgrader for Motron 150 W drev (motor og frekvensomformer) som funktion af momentet.

Ved 50 Hz (nominelt omløbstal, 1.500 o/min) ses det, at totalvirkningsgraden stort set er konstant ved momenter mellem 0,22 og 0,95 Nm (nominelt moment er 0,95 Nm). Ved momenter lavere end 0,22 Nm sker der fald i virkningsgraden. Momentet skal dog under 0,15 Nm, før virkningsgraden for alvor begynder at falde.

Ved 37,5 Hz (1.200 o/min) er billedet stort set det samme. Totalvirkningsgraden er stort set konstant ved momenter mellem 0,2 og 0,8 Nm.

Ved momenter lavere end 0,2 Nm sker der fald i virkningsgraden. Momentet skal dog igen under 0,15 Nm, før virkningsgraden for alvor begynder at falde.

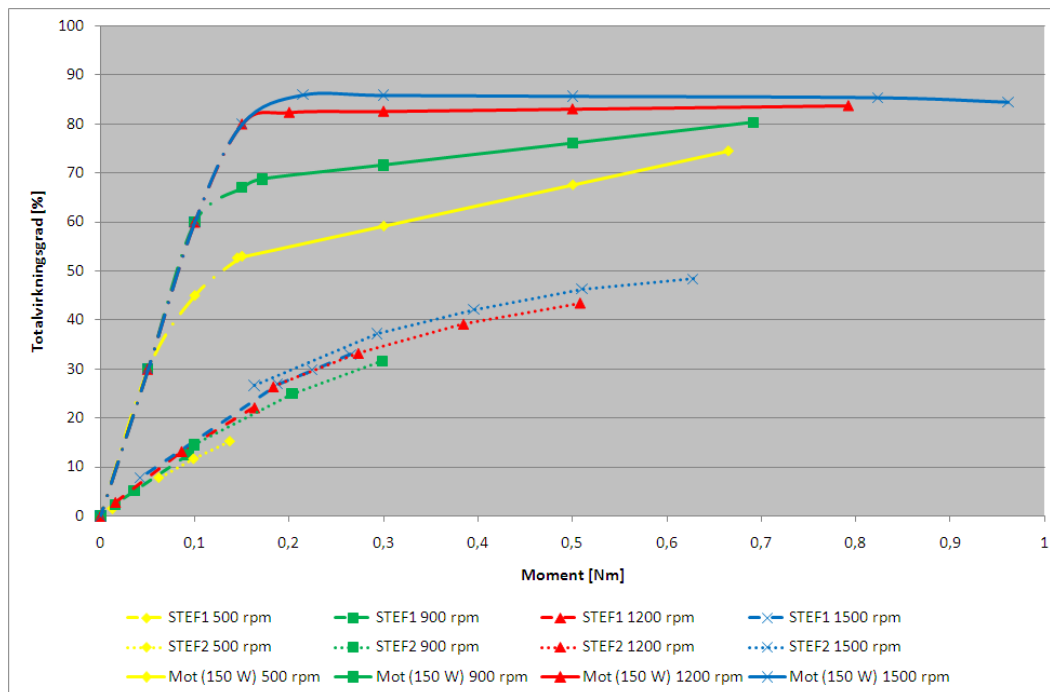
Totalvirkningsgraderne er ved de 37,5 Hz ca. 2 % lavere end totalvirkningsgraderne ved 50 Hz.

Ved 25 Hz og 12,5 Hz (900 o/min og 500 o/min) er totalvirkningsgraden nærmest lineær afhængig af momentet. Ved momenter lavere end 0,15 Nm sker der store fald i virkningsgraderne.

Totalvirkningsgraderne er ved de 25 Hz mellem 7 og 15 % lavere end totalvirkningsgraderne ved 50 Hz. Ved 12,5 Hz er forskellen mellem 12 og 25 %.

3.4.4 Sammenligning

I figur 3.22 ses totalvirkningsgrader for en 0,04 kW og en 0,12 kW asynkronmotor og frekvensomformer samt en 0,15 kW EC motor og frekvensomformer som funktion af momentet. Virkningsgraderne er vist ved fire forskellige omdrejningstal.



Figur 3.22. Totalvirkningsgrader for STEF 1, STEF 2 og Motron 150 W drev (motor og frekvensomformer) som funktion af momentet.

Ved 50 Hz (nominelt omløbstal, 1.500 o/min) ses det, at forskellen i totalvirkningsgraderne for STEF 2 og Motron 150 W er 35 - 50 % i området mellem 0,15 og 0,65 Nm. Den største forskel ses ved de lave momenter.

Forskellen i totalvirkningsgraderne for STEF 1 og Motron 150 W er 20 - 50 % i området mellem 0,05 og 0,27 Nm. Den største forskel ses ved de høje momenter.

Ved 37,5 Hz (1.200 o/min) ses det, at forskellen i totalvirkningsgraderne for STEF 2 og Motron 150 W er 40 - 55 % i området mellem 0,18 og 0,52 Nm. Den største forskel ses ved de lave momenter.

Forskellen i totalvirkningsgraderne for STEF 1 og Motron 150 W er 10 - 60 % i området mellem 0,02 og 0,17 Nm. Den største forskel ses ved de høje momenter.

Ved 25 Hz (900 o/min) ses det, at forskellen i totalvirkningsgraderne for STEF 2 og Motron 150 W er 40 - 45 % i området mellem 0,10 og 0,30 Nm. Den største forskel ses ved de lave momenter.

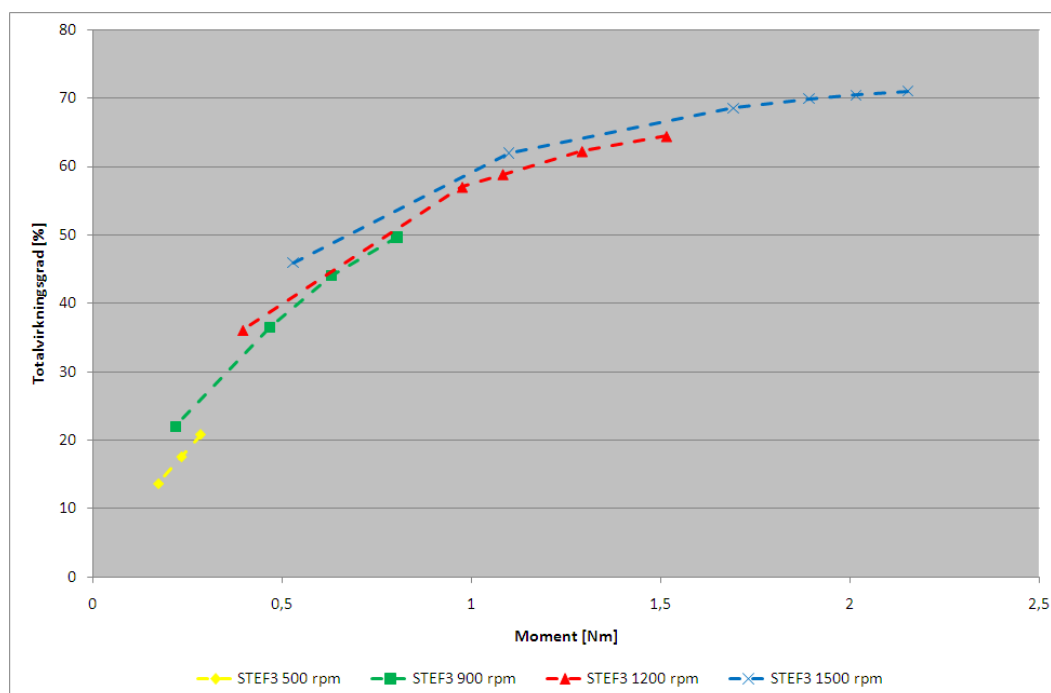
Forskellen i totalvirkningsgraderne for STEF 1 og Motron 150 W er 20 - 45 % i området mellem 0,02 og 0,10 Nm. Den største forskel ses ved de høje momenter.

Ved 12,5 Hz (500 o/min) ses det, at forskellen i totalvirkningsgraderne for STEF 2 og Motron 150 W er 25 - 40 % i området mellem 0,06 og 0,13 Nm. Den største forskel ses ved de høje momenter.

Ved 12,5 Hz har det kun været muligt at foretage en måling på STEF 1. Her var virkningsgraden ca. 1,5 % ved et moment på ca. 0,02 Nm. Motron 150 W havde ved samme moment en virkningsgrad på ca. 10 %.

3.4.5 STEF 3

I figur 3.23 ses totalvirkningsgrader for en 0,37 kW asynkronmotor og frekvensomformer som funktion af momentet. Virkningsgraderne er vist ved fire forskellige omdrejningstal.



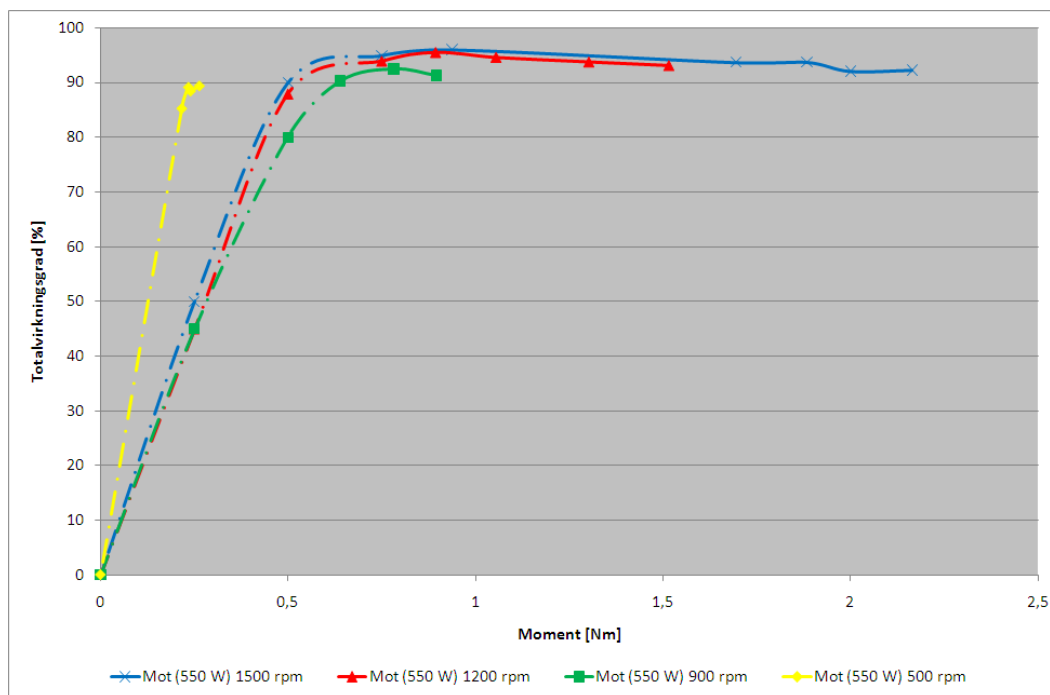
Figur 3.23. Totalvirkningsgrader for STEF 3 drev (motor og frekvensomformer) som funktion af momentet.

Ved 50 Hz (nominelt omløbstal, 1.500 o/min) ses det, at totalvirkningsgraden stiger med momentet i anden potens. (nominelt moment er 2,5 Nm). Ved ca. 0,5 Nm er virkningsgraden ca. 45 % mens den ved 2,5 Nm er ca. 70 %.

Ved 37,5 Hz, 25 Hz og 12,5 Hz er billedet stort set det samme. Ved henholdsvis 37,5 Hz, 25 Hz og 12,5 Hz er virkningsgraderne ca. 3 %, ca. 7 % og ca. 10 % lavere end virkningsgraderne ved 50 Hz. Forskellen ved 12,5 Hz er baseret på et skøn.

3.4.6 Motron 550 W

I figur 3.24 ses totalvirkningsgrader for en 0,55 kW EC motor og frekvensomformer som funktion af momentet. Virkningsgraderne er vist ved fire forskellige omdrejningstal.



Figur 3.24. Totalvirkningsgrader for Motron 550 W drev (motor og frekvensomformer) som funktion af momentet.

Ved 50 Hz (nominelt omløbstal, 1.500 o/min) ses det, at totalvirkningsgraden stort set er konstant ved momenter mellem 0,75 og 2,2 Nm (nominelt moment er 3,5 Nm). Mellem ca. 1,5 Nm og 2,2 Nm falder virkningsgraden dog ca. 3 %.

Ved momenter lavere end 0,75 Nm sker der fald i virkningsgraden. Momentet skal dog under 0,5 Nm, før virkningsgraden for alvor begynder at falde.

Ved 37,5 Hz (1.200 o/min) er billedet stort set det samme. Totalvirkningsgraden er stort set konstant ved momenter mellem 0,75 og 1,5 Nm.

Ved momenter lavere end 0,75 Nm sker der fald i virkningsgraden. Momentet skal dog igen under 0,5 Nm, før virkningsgraden for alvor begynder at falde.

Totalvirkningsgraderne er ved de 37,5 Hz ca. 1 - 2 % lavere end totalvirkningsgraderne ved 50 Hz.

Ved 25 Hz (900 o/min) ses det, at totalvirkningsgraden ligger mellem 90 og 92 % ved momenter mellem 0,6 og 0,9 Nm. Ved momenter lavere end de 0,6 Nm sker der store fald i virkningsgraderne.

Totalvirkningsgraderne er ved de 25 Hz ca. 3 - 4 % lavere end virkningsgraderne ved 50 Hz.

Ved 12,5 Hz (500 o/min) ses det, at totalvirkningsgraden ligger mellem 85 og 90 % ved momenter mellem 0,2 og 0,25 Nm. Ved momenter lavere end de 0,2 Nm sker der store fald i virkningsgraderne.

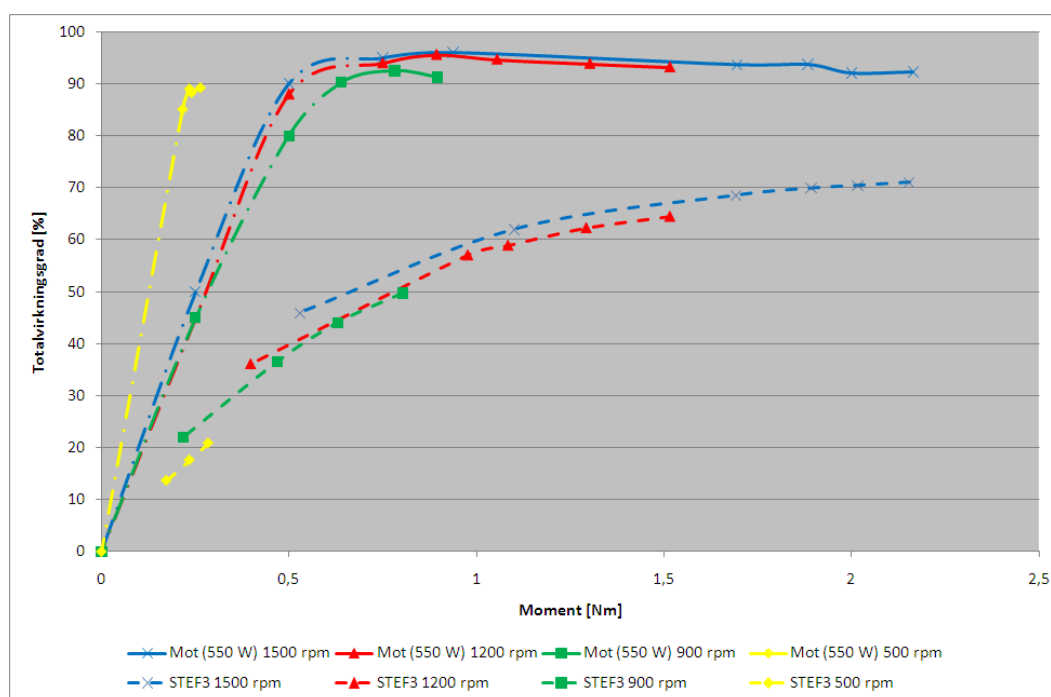
Totalvirkningsgraderne er ved de 25 Hz ca. 5 - 6 % lavere end virkningsgraderne ved 50 Hz.

Det skal understreges, at virkningsgraderne ved 500 o/min er meget usikre pga. momentmålingerne, der ligger til grund for beregningerne.

3.4.7 Sammenligning

I figur 3.25 ses totalvirkningsgrader for en 0,37 kW asynkronmotor og frekvensomformer samt en 550 W EC motor og frekvensomformer som funktion af momentet.

Virkningsgraderne er vist ved fire forskellige omdrejningstal.



Figur 3.25. Totalvirkningsgrader for STEF 3 og Motron 0,55 kW drev (motor og frekvensomformer) som funktion af momentet.

Ved 50 Hz (nominelt omløbstal, 1.500 o/min) ses det, at forskellen i totalvirkningsgraderne for STEF 3 og Motron 550 W er 25 - 50 % i området mellem 0,5 og 2,5 Nm. Den største forskel ses ved de lave momenter.

Ved 37,5 Hz (1.200 o/min) ses det, at forskellen i totalvirkningsgraderne for STEF 3 og Motron 550 W er 30 - 40 % i området mellem 0,4 og 1,5 Nm. Den største forskel ses igen ved de lave momenter.

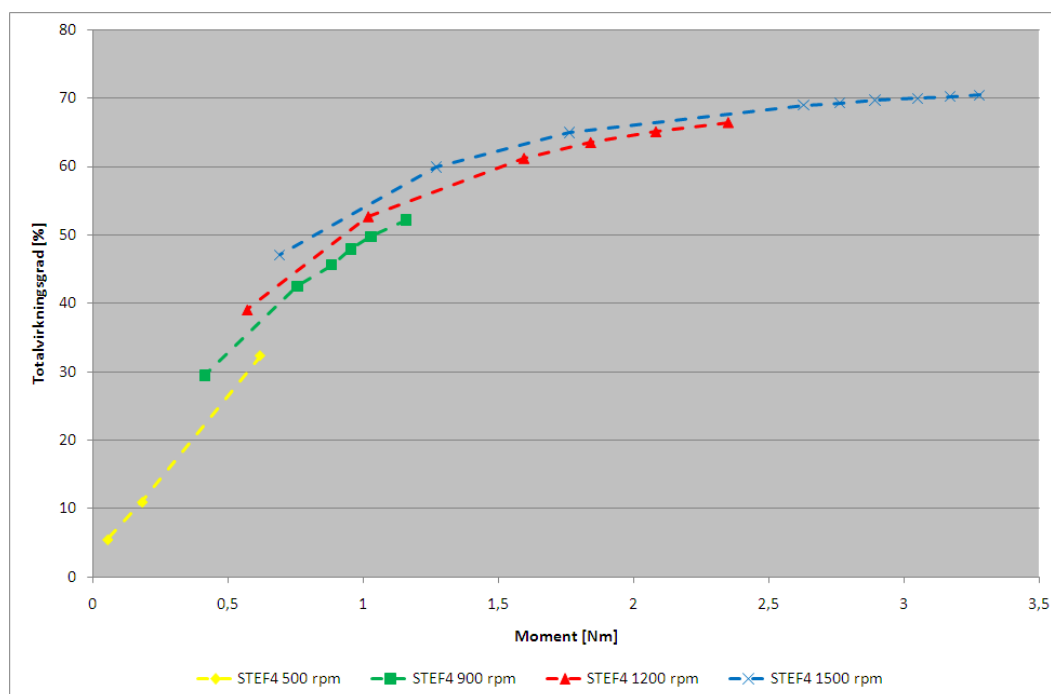
Ved 25 Hz (900 o/min) ses det, at forskellen i totalvirkningsgraderne for STEF 3 og Motron 550 W er 20 - 40 % i området mellem 0,2 og 0,8 Nm. Den største forskel ses ved de høje momenter.

Ved 12,5 Hz (500 o/min) ses det, at forskellen i totalvirkningsgraderne for STEF 3 og Motron 550 W er 55 - 70 % i området mellem 0,15 og 0,3 Nm. Den største forskel ses ved de høje momenter.

Det skal understreges, at virkningsgraderne for Motron 550 W ved 500 o/min er meget usikre pga. momentmålingerne, der ligger til grund for beregningerne.

3.4.8 STEF 4

I figur 3.26 ses totalvirkningsgrader for en 0,55 kW asynkronmotor og frekvensomformer som funktion af momentet. Virkningsgraderne er vist ved fire forskellige omdrejningstal.



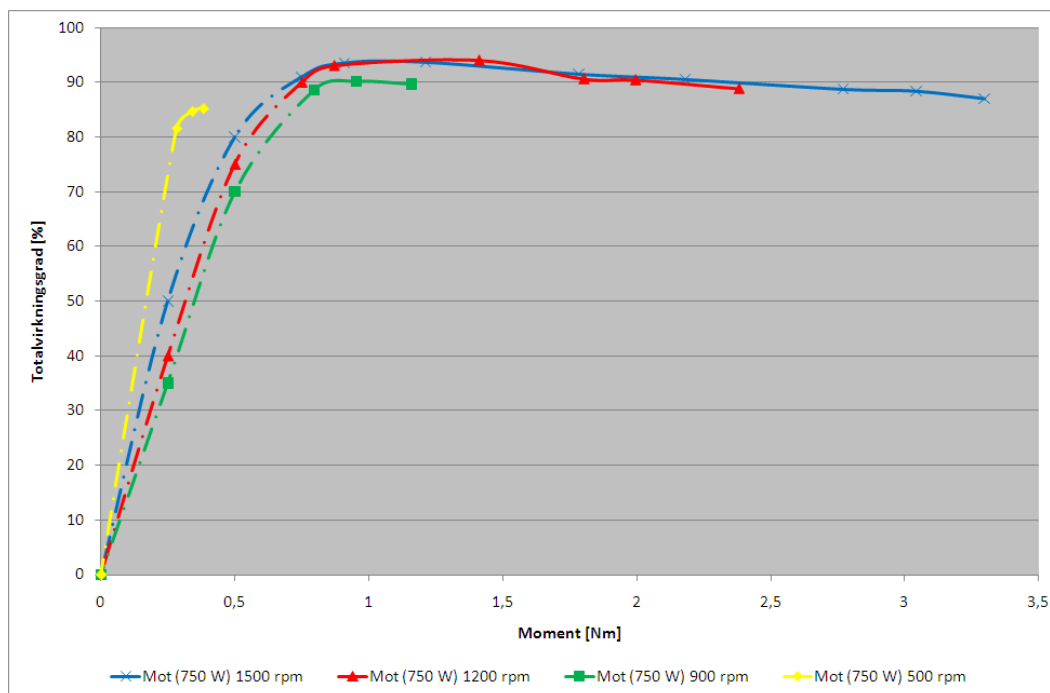
Figur 3.26. Totalvirkningsgrader for STEF 4 drev (motor og frekvensomformer) som funktion af momentet.

Ved 50 Hz (nominelt omløbstal, 1.500 o/min) ses det, at totalvirkningsgraden stiger med momentet i anden potens. (nominelt moment er 3,75 Nm). Ved ca. 0,6 Nm er virkningsgraden ca. 47 % mens den ved 3,5 Nm er ca. 70 %.

Ved 37,5 Hz, 25 Hz og 12,5 Hz er billedet stort set det samme. Ved henholdsvis 37,5 Hz, 25 Hz og 12,5 Hz er virkningsgraderne ca. 3 %, ca. 7 % og ca. 10 % lavere end virkningsgraderne ved 50 Hz. Forskellen ved 12,5 Hz er baseret på et skøn.

3.4.9 Motron 750 W

I figur 3.27 ses totalvirkningsgrader for en 0,75 kW EC motor og frekvensomformer som funktion af momentet. Virkningsgraderne er vist ved fire forskellige omdrejningstal.



Figur 3.27. Totalvirkningsgrader for Motron 0,75 kW drev (motor og frekvensomformer) som funktion af momentet.

Ved 50 Hz (nominelt omløbstal, 1.500 o/min) ses det, at totalvirkningsgraden falder fra 93 % ved 1 Nm til 87 % ved 3,25 Nm.

Ved momenter lavere end 1 Nm sker der fald i virkningsgraden. Momentet skal dog under 0,75 Nm, før virkningsgraden for alvor begynder at falde.

Ved 37,5 Hz (1.200 o/min) er billedet stort set det samme. Totalvirkningsgraden falder fra 93 % ved 1 Nm til 89 % ved 2,5 Nm.

Ved momenter lavere end 1 Nm sker der fald i virkningsgraden. Momentet skal dog igen under 0,75 Nm, før virkningsgraden for alvor begynder at falde.

Totalvirkningsgraderne er ved de 37,5 Hz det samme som totalvirkningsgraderne ved 50 Hz.

Ved 25 Hz (900 o/min) ses det, at totalvirkningsgraden ligger på ca. 90 % ved momenter mellem 0,75 og 1,25 Nm. Ved momenter lavere end de 0,75 Nm sker der store fald i virkningsgraderne.

Totalvirkningsgraderne er ved de 25 Hz ca. 2 - 3 % lavere end virkningsgraderne ved 50 Hz.

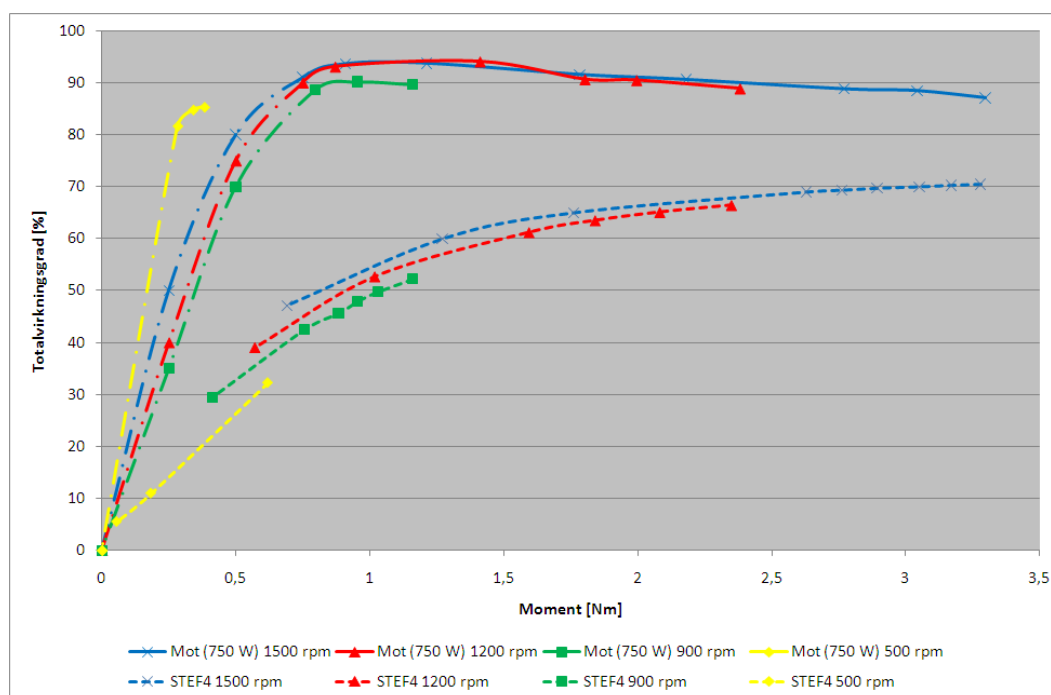
Ved 12,5 Hz (500 o/min) ses det, at totalvirkningsgraden ligger mellem 82 og 85 % ved momenter mellem 0,3 og 0,4 Nm. Ved momenter lavere end de 0,3 Nm sker der store fald i virkningsgraderne.

Totalvirkningsgraderne er ved de 25 Hz ca. 7 - 8 % lavere end virkningsgraderne ved 50 Hz.

Det skal understreges, at virkningsgraderne ved 500 o/min er meget usikre pga. momentmålingerne, der ligger til grund for beregningerne.

3.4.10 Sammenligning

I figur 3.28 ses totalvirkningsgrader for en 0,55 kW asynkronmotor og frekvensomformer samt en 0,75 kW EC motor og frekvensomformer som funktion af momentet. Virkningsgraderne er vist ved fire forskellige omdrejningstal.



Figur 3.28. Totalvirkningsgrader for STEF 4 og Motron 0,75 kW drev (motor og frekvensomformer) som funktion af momentet.

Ved 50 Hz (nominelt omløbstal, 1.500 o/min) ses det, at forskellen i totalvirkningsgraderne for STEF 4 og Motron 750 W er 18 - 45 % i området mellem 0,75 og 3,5 Nm. Den største forskel ses ved de lave momenter.

Ved 37,5 Hz (1.200 o/min) ses det, at forskellen i totalvirkningsgraderne for STEF 4 og Motron 750 W er 22 - 45 % i området mellem 0,6 og 2,5 Nm. Den største forskel ses igen ved de lave momenter.

Ved 25 Hz (900 o/min) ses det, at forskellen i totalvirkningsgraderne for STEF 4 og Motron 750 W er 35 - 40 % i området mellem 0,4 og 1,2 Nm. Den største forskel ses ved de høje momenter.

Ved 12,5 Hz (500 o/min) ses det, at forskellen i totalvirkningsgraderne for STEF 4 og Motron 750 W er 55 - 70 % i området mellem 0,25 og 0,35 Nm. Den største forskel ses ved de høje momenter.

Det skal understreges, at virkningsgraderne for Motron 750 W ved 500 o/min er meget usikre pga. momentmålingerne, der ligger til grund for beregningerne.

4 Ventilatorer

4.1 Test af store ventilatorer

I TI's ventilationslaboratorium er der foretaget tests på to af Ølands ventilatorer (mellem og stor størrelse). Ventilatorerne blev forsynet med henholdsvis EFF1 asynkronmotorer samt PM-motorer. Testene blev foretaget ved fire forskellige omdrejningstal på ventilatorerne samt varierende volumenstrømme og totale trykstigninger (se figur 4.3).

4.1.1 Test af GTLB-1-063 ventilator

GTLB-1-063 er en direkte trukket, enkelt Sugende ventilator med bagoverbøjede skovle. Ventilatorens maksimale omløbstal er 1.450 rpm.

Ventilatoren drives af en 5,5 kW asynkronmotor med nominelt omløbstal på 1.500 rpm.



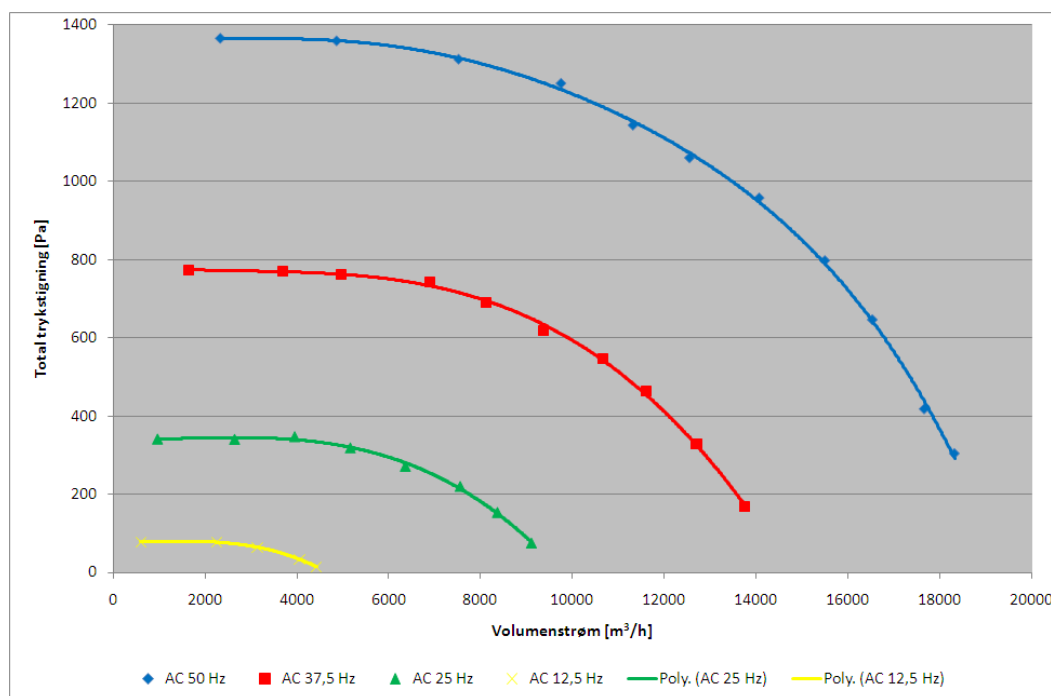
Figur 4.1. Test af GTLB-1-063 ventilator med asynkronmotor.

I figur 4.2 ses totale trykstigninger over ventilatoren som funktion af volumenstrømmen ved fire forskellige omdrejningstal.

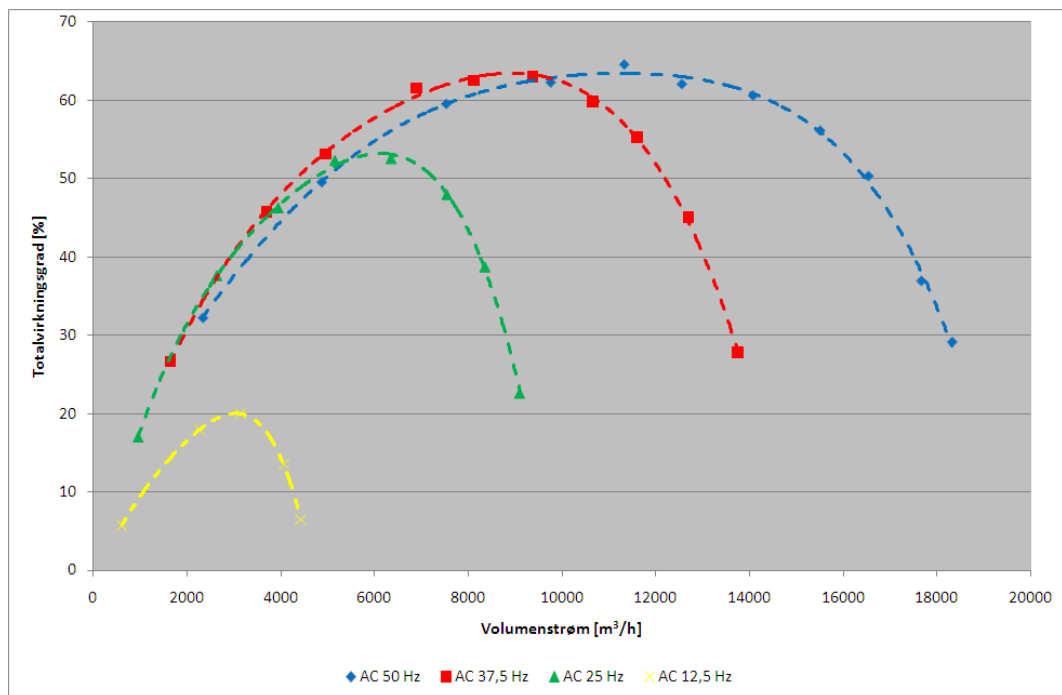
Som det ses afhænger både den totale trykstigning over ventilatoren og volumenstrømmen af ventilatorens omdrejningstal.

I figur 4.3 ses totalvirkningsgrader (ventilator, motor og frekvensomformer) som funktion af volumenstrømmen ved fire forskellige omdrejningstal.

Som det ses afhænger totalvirkningsgraden i høj grad af volumenstrømmen. Den højest opnåede totalvirkningsgrad på ca. 63 % er opnået ved 1.500 rpm (50 Hz for motoren).



Figur 4.2. Total trykstigning som funktion af volumenstrømmen.



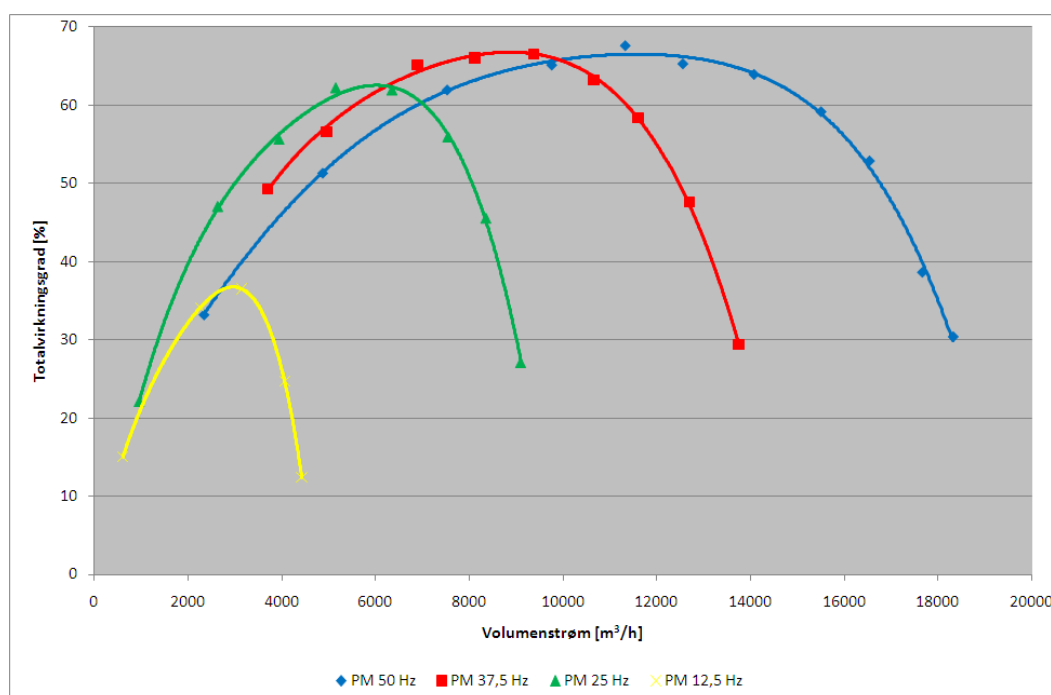
Figur 4.3. Totalvirkningsgrader (ventilator, motor og frekvensomformer) som funktion af volumenstrømmen ved fire forskellige omdrejningstal.



Figur 4.4. Test af GTLB-1-063 ventilator med PM motor

I figur 4.5 ses totalvirkningsgrader (ventilator, motor og frekvensomformer) som funktion af volumenstrømmen ved fire forskellige omdrejningstal.

Som det ses afhænger totalvirkningsgraden i høj grad af volumenstrømmen. Den højest opnåede totalvirkningsgrad på ca. 66 % er opnået ved 1.500 rpm (50 Hz for motoren).



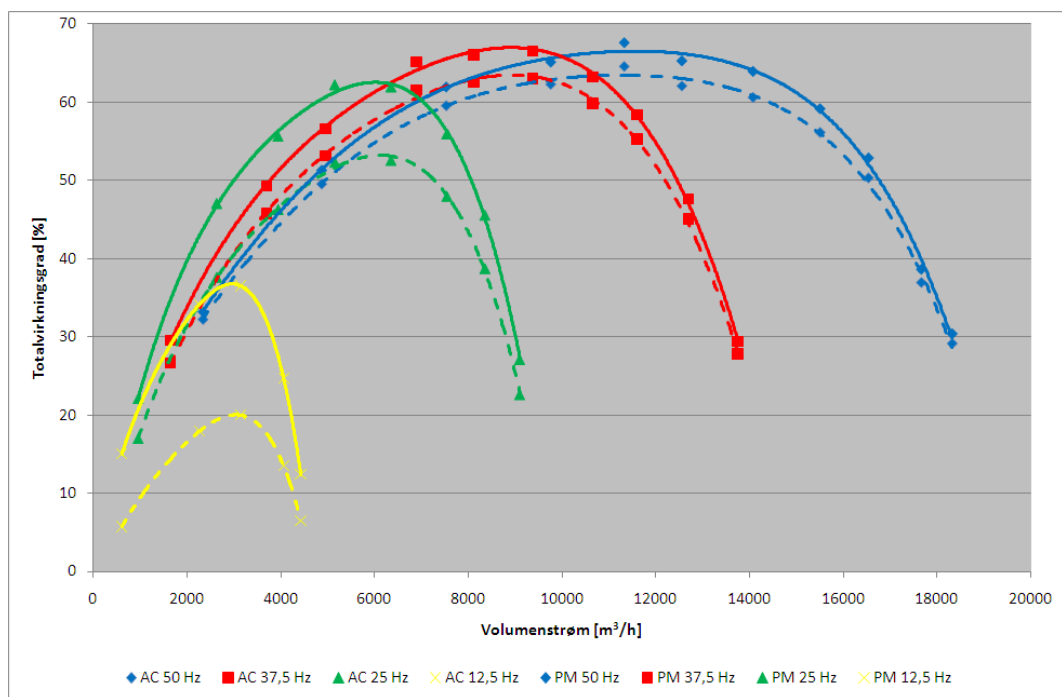
Figur 4.5. Totalvirkningsgrader (ventilator, motor og frekvensomformer) som funktion af volumenstrømmen ved fire forskellige omdrejningstal.

I figur 4.6 ses totalvirkningsgrader for ventilationssystemet med henholdsvis asynkronmotor og PM motor. Virkningsgraderne er vist ved fire forskellige omdrejningstal.

Ved 50 og 37,5 Hz ligger forskellene i totalvirkningsgraderne mellem 1 og 4 %. De største forskelle ved de to omdrejningstal ligger ved henholdsvis ca. 13.000 m³/h og ca. 9.000 m³/h.

Ved 25 Hz er forskellene betydeligt større. Her ligger forskellene mellem 6 og 10 %. Den største forskel ved ca. 6.000 m³/h.

Ved 12,5 Hz er forskellene endnu større. Her ligger forskellene mellem 8 og 16 %. Den største forskel ved ca. 3.000 m³/h.

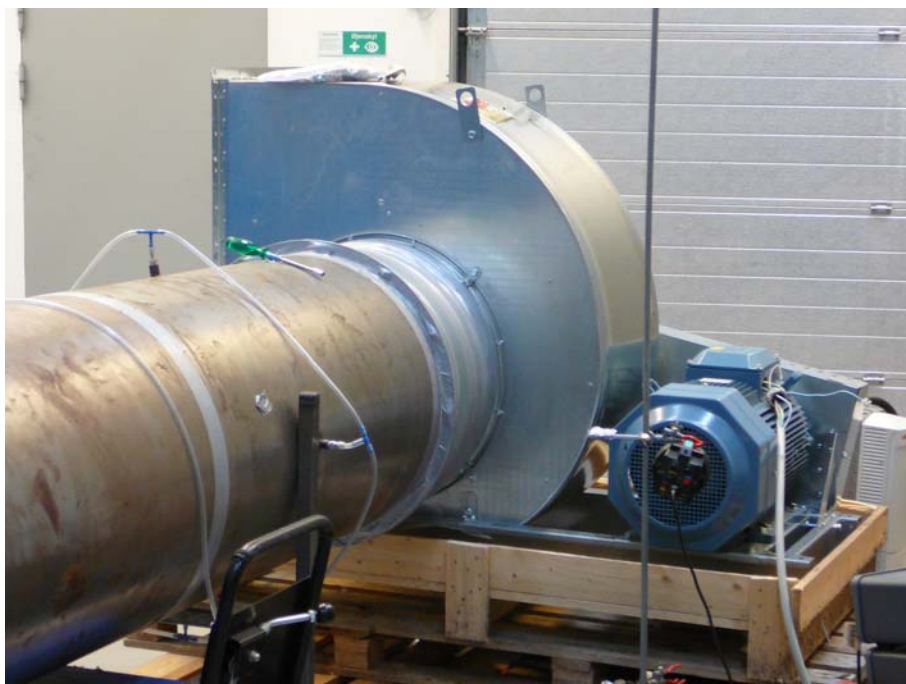


Figur 4.6. Totalvirkningsgrader (ventilator, motor og frekvensomformer) som funktion af volumenstrømmen ved fire forskellige omdrejningstal.

4.1.2 Test af GTHB-3-063 ventilator

GTHB-3-063 er en remtrukket, enkelt Sugende ventilator med bagoverbøjede skovle. Ventilatorens maksimale omløbstal er 2.100 rpm.

Ventilatoren drives af en 18,5 kW asynkronmotor med nominelt omløbstal på 1.500 rpm.



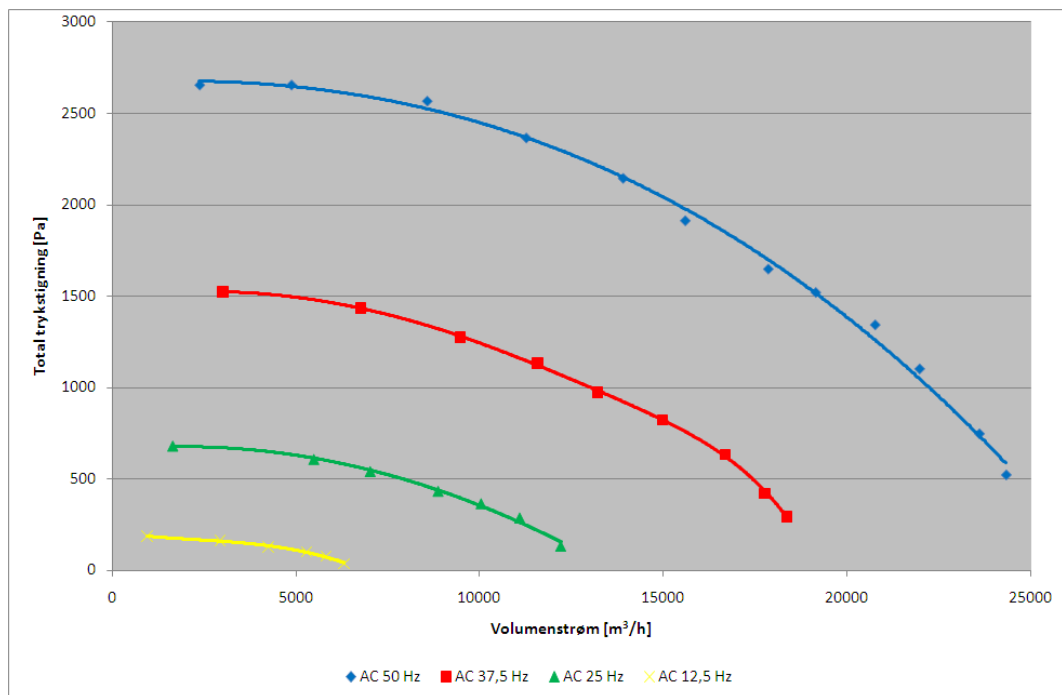
Figur 4.8. Test af GTHB-3-063 ventilator med asynkronmotor

I figur 4.9 ses totale trykstigninger over ventilatoren som funktion af volumenstrømmen ved fire forskellige omdrejningstal.

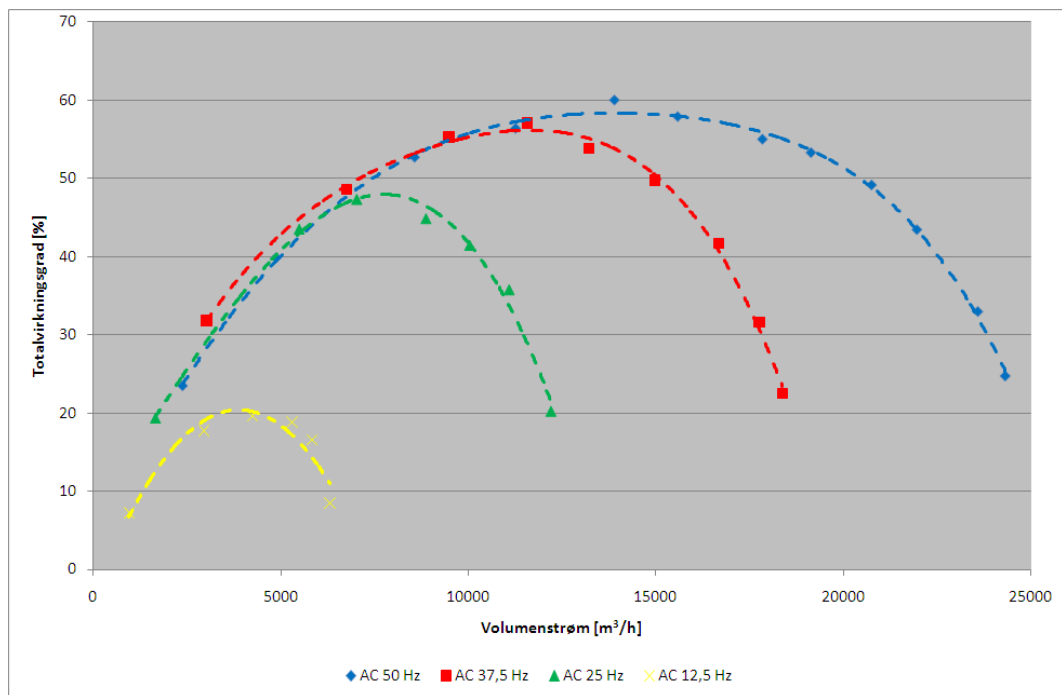
Som det ses afhænger både den totale trykstigning over ventilatoren og volumenstrømmen af ventilatorens omdrejningstal.

I figur 4.10 ses totalvirkningsgrader (ventilator, motor og frekvensomformer) som funktion af volumenstrømmen ved fire forskellige omdrejningstal.

Som det ses afhænger totalvirkningsgraden i høj grad af volumenstrømmen. Den højest opnåede totalvirkningsgrad på 60 % er opnået ved 2.100 rpm (50 Hz for motoren).



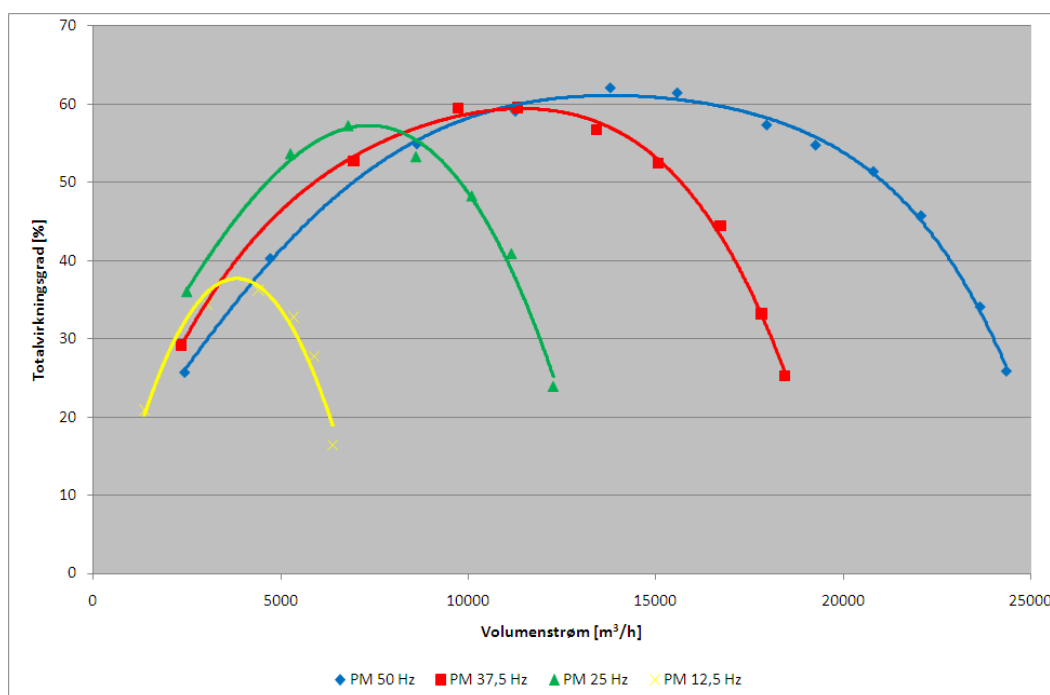
Figur 4.9. Total trykstigning som funktion af volumenstrømmen.



Figur 4.10. Totalvirkningsgrader (ventilator, motor og frekvensomformer) som funktion af volumenstrømmen ved fire forskellige omdrejningstal.



Figur 4.11. Test af GTHB-3-063 ventilator med PM motor



Figur 4.12. Totalvirkningsgrader (ventilator, motor og frekvensomformer) som funktion af volumenstrømmen ved fire forskellige omdrejningstal.

I figur 4.12 ses totalvirkningsgrader (ventilator, motor og frekvensomformer) som funktion af volumenstrømmen ved fire forskellige omdrejningstal.

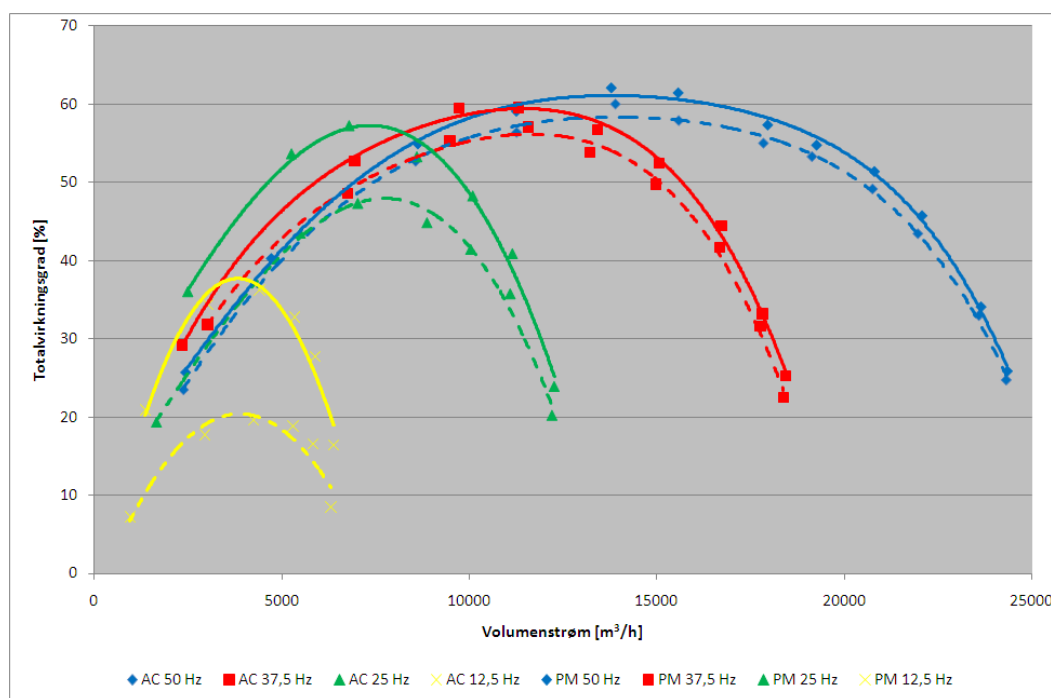
Igen afhænger totalvirkningsgraden i høj grad af volumenstrømmen. Den højest opnåede totalvirkningsgrad på ca. 63 % er opnået ved 2.100 rpm (50 Hz for motoren).

I figur 4.13 ses totalvirkningsgrader for ventilationssystemet med henholdsvis asynkronmotor og PM motor. Virkningsgraderne er vist ved fire forskellige omdrejningstal.

Ved 50 og 37,5 Hz ligger forskellene i totalvirkningsgraderne mellem 1 og 3 %. De største forskelle ved de to omdrejningstal ligger ved henholdsvis ca. 15.000 m³/h og ca. 11.000 m³/h.

Ved 25 Hz er forskellene betydeligt større. Her ligger forskellene mellem 5 og 10 %. Den største forskel ved ca. 7.000 m³/h.

Ved 12,5 Hz er forskellene endnu større. Her ligger forskellene mellem 8 og 16 %. Den største forskel ved ca. 4.000 m³/h.



Figur 4.13. Totalvirkningsgrader (ventilator, motor og frekvensomformer) som funktion af volumenstrømmen ved fire forskellige omdrejningstal.

4.2 Test af små ventilatorer

Der er foretaget en række tests på Ølands STEF 1-4 tagventilatorer. Tagventilatorerne benyttes primært til boligventilation, men også til institutions- og erhvervsventilation. Tagventilatorerne leveres med både AC og EC motorer, som er monteret direkte på ventilatorerne. Disse motorer sidder udenfor luftstrømmen. Ventilatorerne er med bagudbøjede skovle (B-hjul).



Figur 4.8. STEF 1-4 tagventilatorer.

4.2.1 Test af STEF 1, 2, 3 og 4 tagventilatorer

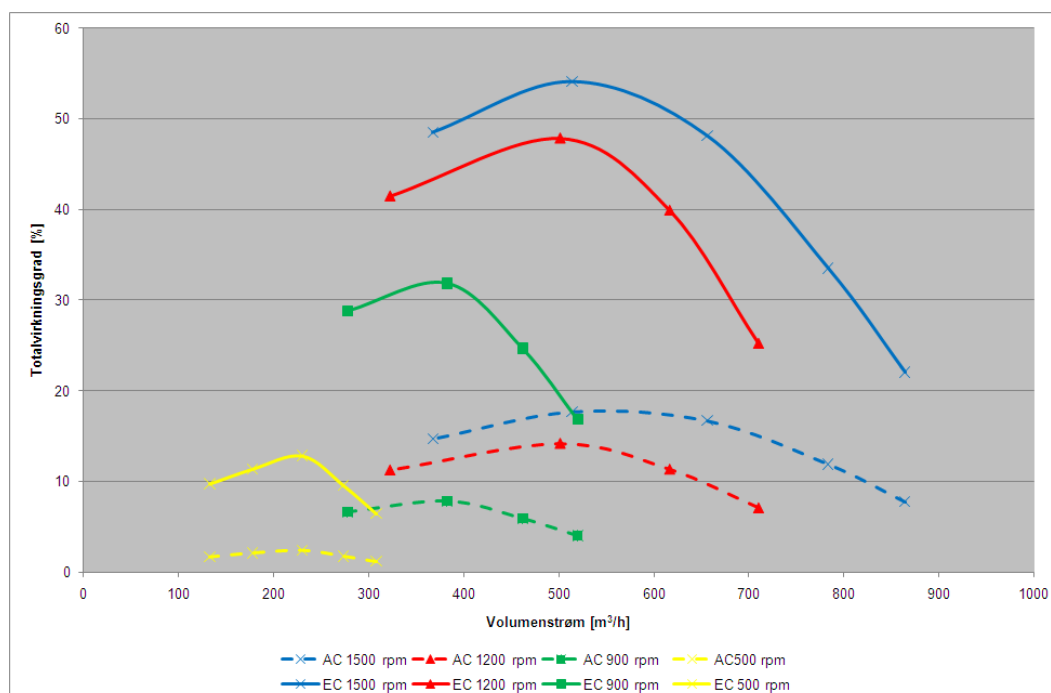
I figur 4.10 til 4.13 ses totalvirkningsgrader (ventilator, motor- og frekvensomformer) for STEF 1-4 tagventilatorerne som funktion af volumenstrømmen. Totalvirkningsgraderne ses ved nominelt omdrejningstal (100 %) samt yderligere tre omdrejningstal (75 %, 50 % og 25 %).

Totalvirkningsgraderne er beregnet på baggrund af målinger af volumenstrømme, total trykdifferens over ventilatorerne samt effektoptag for motorerne (inkl. frekvensomformere).



Figur 4.9. Opstilling til ventilationstekniske målinger på STEF tagventilatorer.

I figur 4.10 ses totalvirkningsgrader for STEF 1 ventilationssystem (ventilator, motor og frekvensomformer) som funktion af volumenstrømmen.



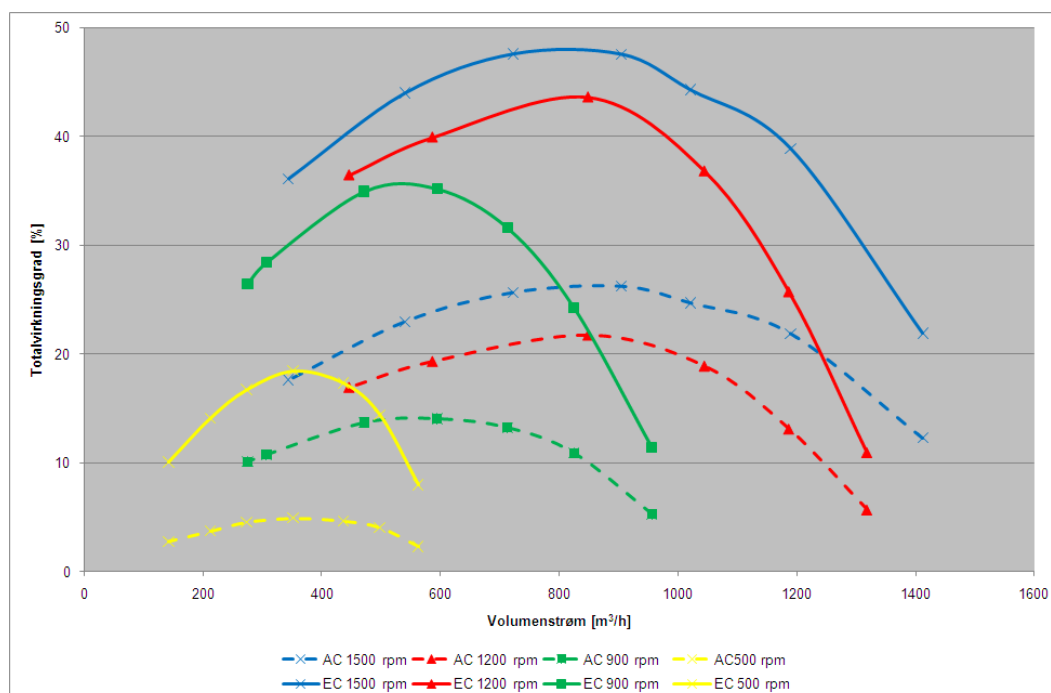
Figur 4.10. Totalvirkningsgrader for STEF 1 ventilationssystem (ventilator, motor og frekvensomformer) som funktion af volumenstrømmen.

I figur 4.10 ses totalvirkningsgrader (ventilator, motor og frekvensomformer) med henholdsvis asynkronmotor og EC motor som funktion af volumenstrømmen. Virkningsgraderne er vist ved fire forskellige omdrejningstal.

Som det ses afhænger totalvirkningsgraden både af volumenstrømmen og omdrejningstallet. For dette ventilationssystem ses den største forskel i virkningsgraden (med henholdsvis asynkronmotor og EC motor) ved 1.500 rpm (50 Hz for motorerne). Ved dette omdrejningstal og en volumenstrøm på ca. 500 m³/h ses det, at forskellen er ca. 37 %.

Ved lavere omdrejningstal reduceres forskellen. Ved 500 rpm er den største forskel ca. 10 % ved 225 m³/h.

I figur 4.11 ses totalvirkningsgrader for STEF 2 ventilationssystem (ventilator, motor og frekvensomformer) som funktion af volumenstrømmen.



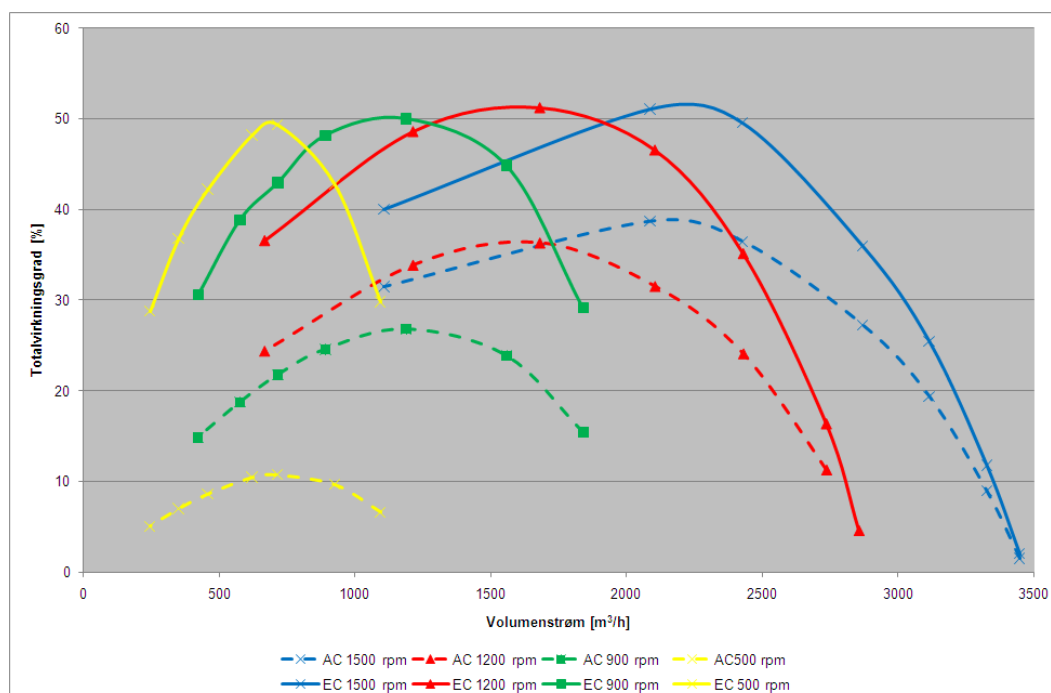
Figur 4.11. Totalvirkningsgrader for STEF 2 ventilationssystem (ventilator, motor og frekvensomformer) som funktion af volumenstrømmen.

I figur 4.11 ses totalvirkningsgrader (ventilator, motor og frekvensomformer) med henholdsvis asynkronmotor og EC motor som funktion af volumenstrømmen. Virkningsgraderne er vist ved fire forskellige omdrejningstal.

Som det ses afhænger totalvirkningsgraden både af volumenstrømmen og omdrejningstallet. For dette ventilationssystem ses den største forskel i virkningsgraden (med henholdsvis asynkronmotor og EC motor) ved 1.500 rpm (50 Hz for motorerne). Ved dette omdrejningstal og en volumenstrøm på ca. 825 m³/h ses det, at forskellen er ca. 22 %.

Ved lavere omdrejningstal reduceres forskellen. Ved 500 rpm er den største forskel ca. 13 % ved 375 m³/h.

I figur 4.12 ses totalvirkningsgrader for STEF 3 ventilationssystem (ventilator, motor og frekvensomformer) som funktion af volumenstrømmen.



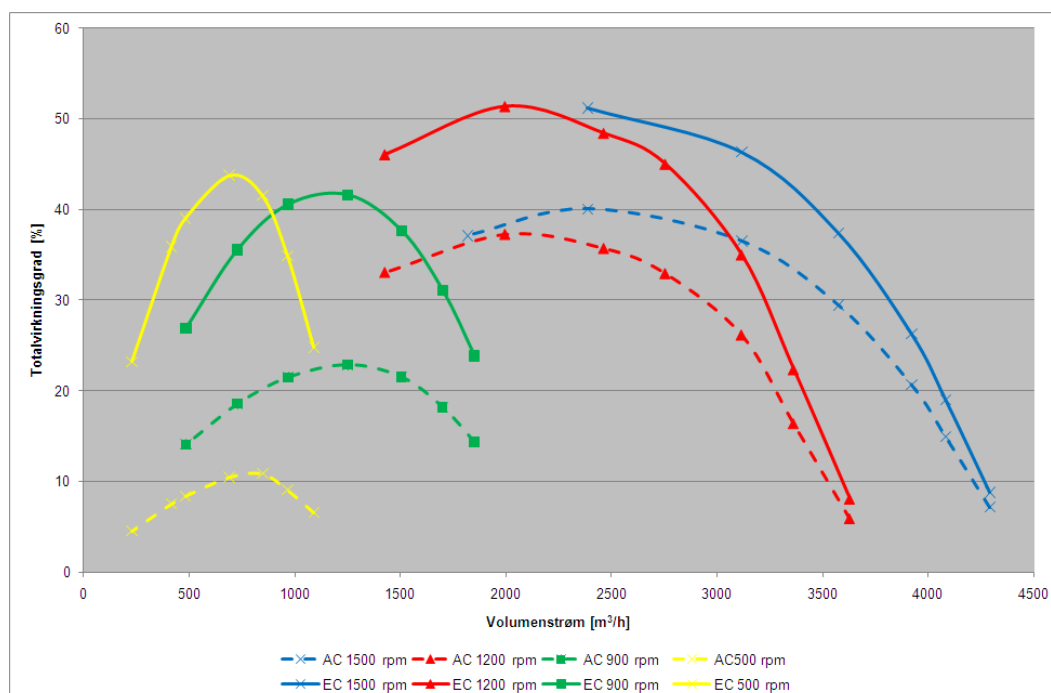
Figur 4.12. Totalvirkningsgrader for STEF 3 ventilationssystem (ventilator, motor og frekvensomformer) som funktion af volumenstrømmen.

I figur 4.12 ses totalvirkningsgrader (ventilator, motor og frekvensomformer) med henholdsvis asynkronmotor og EC motor som funktion af volumenstrømmen. Virkningsgraderne er vist ved fire forskellige omdrejningstal.

Som det ses afhænger totalvirkningsgraden både af volumenstrømmen og omdrejningstallet. For dette ventilationssystem ses den største forskel i virkningsgraden (med henholdsvis asynkronmotor og EC motor) ved 500 rpm (12,5 Hz for motorerne). Ved dette omdrejningstal og en volumenstrøm på ca. 700 m³/h ses det, at forskellen er ca. 38 %.

Ved højere omdrejningstal reduceres forskellen. Ved 1.500 rpm er den største forskel ca. 13 % ved 2.200 m³/h.

I figur 4.13 ses totalvirkningsgrader for STEF 4 ventilationssystem (ventilator, motor og frekvensomformer) som funktion af volumenstrømmen.



Figur 4.13. Totalvirkningsgrader for STEF 4 ventilationssystem (ventilator, motor og frekvensomformer) som funktion af volumenstrømmen.

I figur 4.13 ses totalvirkningsgrader (ventilator, motor og frekvensomformer) med henholdsvis asynkronmotor og EC motor som funktion af volumenstrømmen. Virkningsgraderne er vist ved fire forskellige omdrejningstal.

Som det ses afhænger totalvirkningsgraden både af volumenstrømmen og omdrejningstallet. For dette ventilationssystem ses den største forskel i virkningsgraden (med henholdsvis asynkronmotor og EC motor) ved 500 rpm (12,5 Hz for motorerne). Ved dette omdrejningstal og en volumenstrøm på ca. 700 m³/h ses det, at forskellen er ca. 35 %.

Ved højere omdrejningstal reduceres forskellen. Ved 1.200 rpm er den største forskel ca. 15 % ved 2.000 m³/h.

5 Pumper

5.1 Test af pumper

I TI's pumpelaboratorium er der foretaget tests på to af DESMI's cirkulationspumper (mellem og stor størrelse). Pumperne blev forsynet med henholdsvis EFF1 asynkronmotorer samt PM-motorer. Testene blev foretaget ved fire forskellige omdrejningstal på pumperne samt varierende flow og løftehøjder (se figur 5.2).

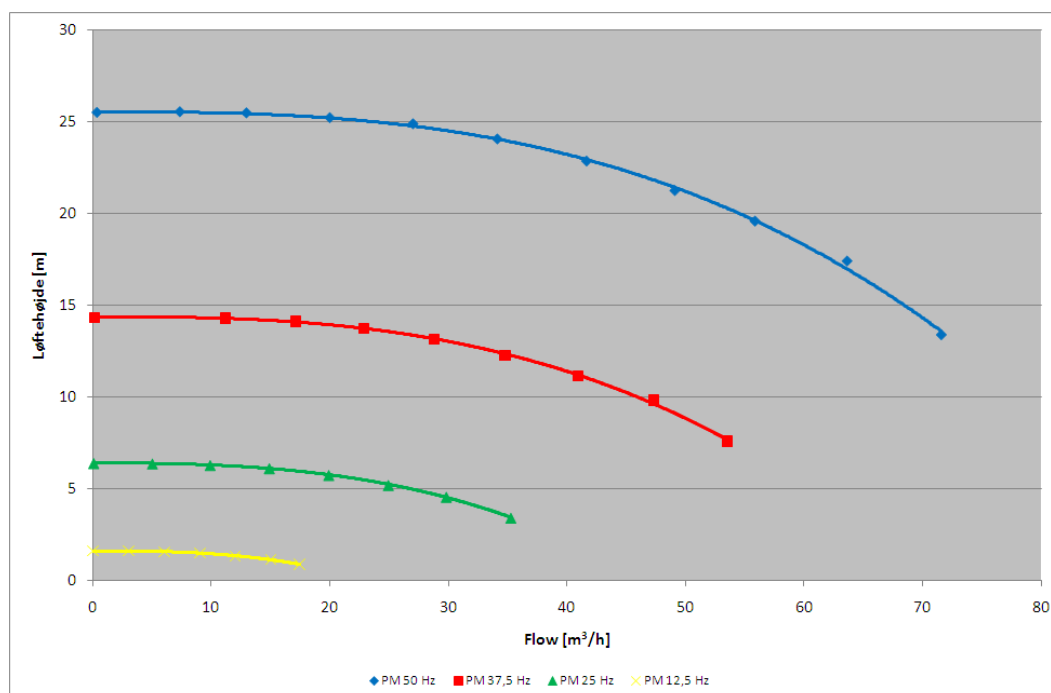
5.1.1 Test af NSL 80 - 265

NSL 80 - 265 er en in-line cirkulationspumpe med et maksimalt omløbstal på 1.500 rpm. Pumpen drives af en 4 kW asynkronmotor (4,5 kW PM motor) med nominelt omløbstal på 1.500 rpm.



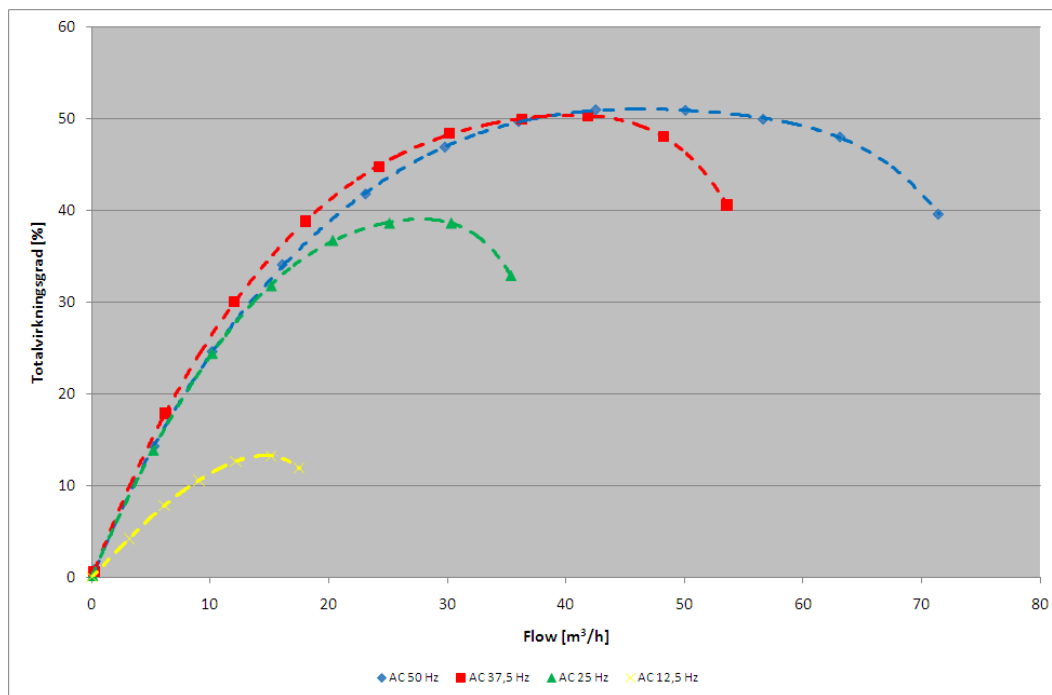
Figur 5.1. Test af NSL 80-265 med 4 kW asynkronmotor

I figur 5.2 ses løftehøjden som funktion af flowet ved fire forskellige omdrejningstal. Som det ses afhænger både løftehøjden og flowet af pumpens omdrejningstal.



Figur 5.2. Total trykstigning som funktion af volumenstrømmen.

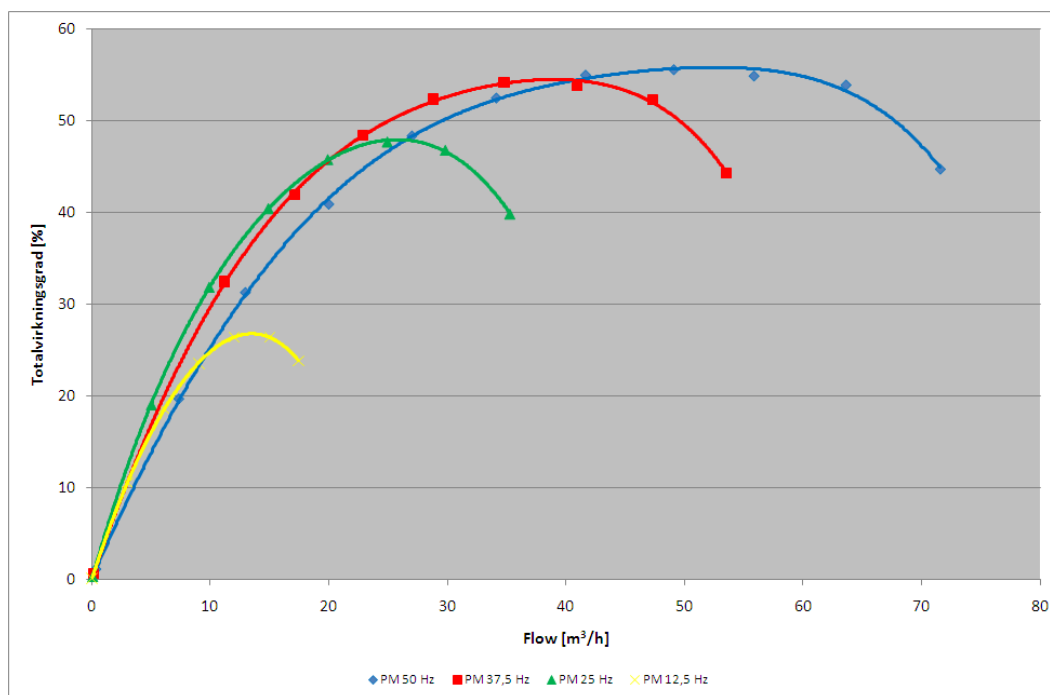
I figur 5.3 ses totalvirkningsgrader (pumpe, motor og frekvensomformer) som funktion af flowet ved fire forskellige omdrejningstal. Som det ses afhænger totalvirkningsgraden i høj grad af flowet. Den højest opnåede totalvirkningsgrad på ca. 51 % er opnået ved 1.500 rpm (50 Hz for motoren).



Figur 5.3. Totalvirkningsgrader (pumpe, motor og frekvensomformer) som funktion af volumenstrømmen ved fire forskellige omdrejningstal.



Figur 5.4. Test af NSL 80-265 med PM motor



Figur 5.5. Totalvirkningsgrader (pumpe, motor og frekvensomformer) som funktion af volumenstrømmen ved fire forskellige omdrejningstal.

I figur 5.5 ses totalvirkningsgrader (pumpe, motor og frekvensomformer) som funktion af flowet ved fire forskellige omdrejningstal.

Igen afhænger totalvirkningsgraden i høj grad af volumenstrømmen. Den højest opnåede totalvirkningsgrad på ca. 56 % er opnået ved 1.500 rpm (50 Hz for motoren).

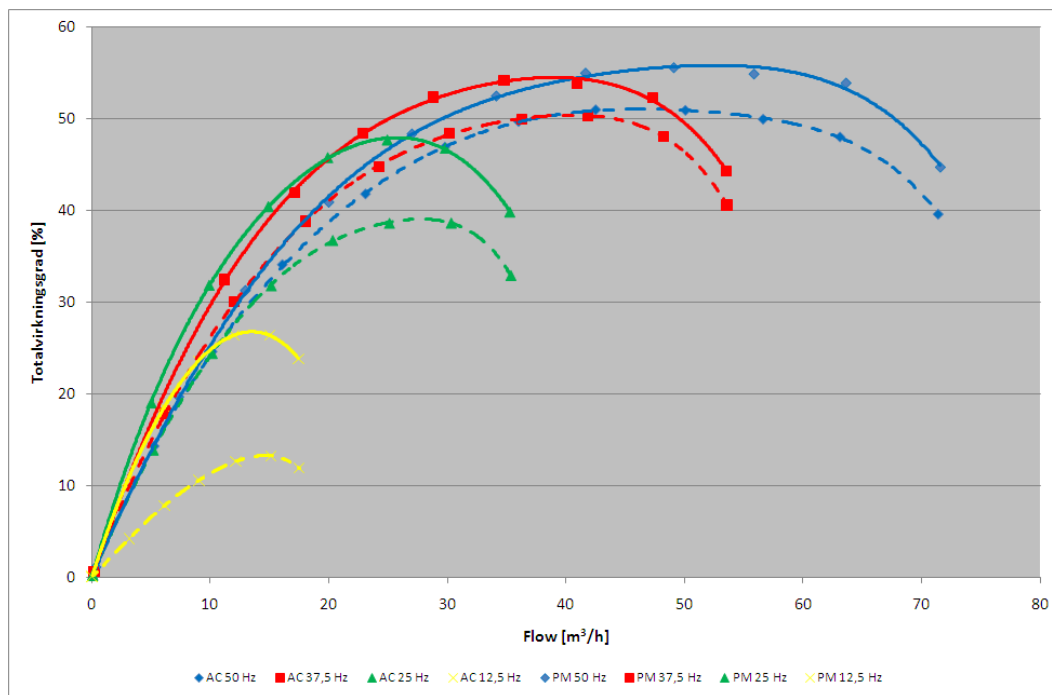
I figur 5.6 ses totalvirkningsgrader for pumpesystemet med henholdsvis asynkronmotor og PM motor. Virkningsgraderne er vist ved fire forskellige omdrejningstal.

Ved 50 Hz ligger forskellene i totalvirkningsgraderne mellem 4 og 6 %. Den største forskel ses ved ca. 55 m³/h.

Ved 37,5 Hz ligger forskellene i totalvirkningsgraderne mellem 4 og 5 %. Den største forskel ses ved ca. 35 m³/h.

Ved 25 Hz er forskellene betydeligt større. Her ligger forskellene mellem 7 og 9 %. Den største forskel ses ved ca. 25 m³/h.

Ved 12,5 Hz er forskellene endnu større. Her ligger forskellene mellem 11 og 13 %. Den største forskel ved ca. 13 m³/h.



Figur 5.6. Totalvirkningsgrader (pumpe, motorer og frekvensomformer) som funktion af volumenstrømmen ved fire forskellige omdrejningstal.

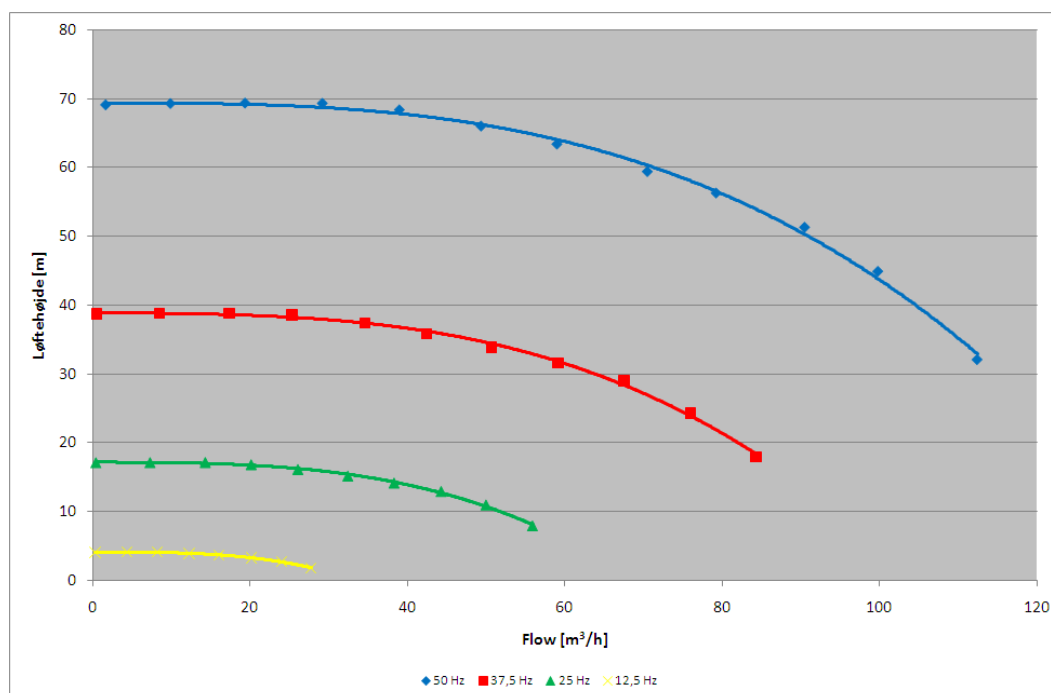
5.1.2 Test af NSL 80 - 215

NSL 80 - 215 er en in-line cirkulationspumpe med et maksimalt omløbstal på 3.000 rpm. Pumpen drives af en 18,5 kW asynkronmotor (19,7 kW PM motor) med nominelt omløbstal på 3.000 rpm.



Figur 5.7. Test af NSL 80-215 med asynkronmotor

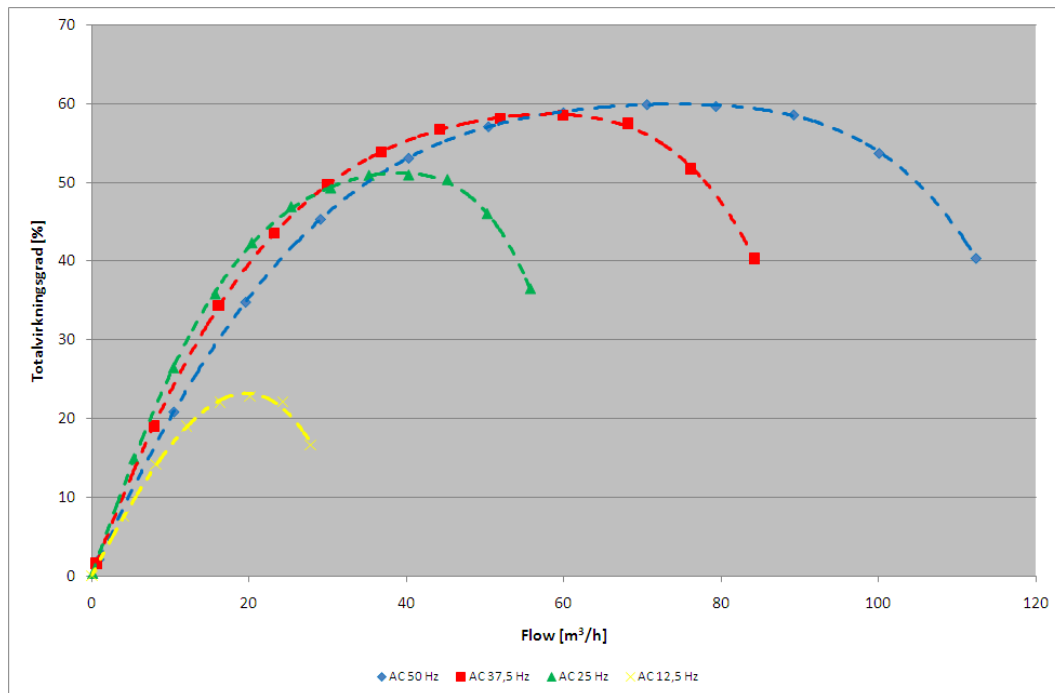
I figur 5.8 ses løftehøjden som funktion af flowet ved fire forskellige omdrejningstal. Som det ses afhænger både løftehøjden og flowet af pumpens omdrejningstal.



Figur 5.8. Total trykstigning som funktion af volumenstrømmen.

I figur 5.9 ses totalvirkningsgrader (pumpe, motor og frekvensomformer) som funktion af flowet ved fire forskellige omdrejningstal.

Som det ses afhænger totalvirkningsgraden i høj grad af flowet. Den højest opnåede totalvirkningsgrad på ca. 60 % er opnået ved 3.000 rpm (50 Hz for motoren).



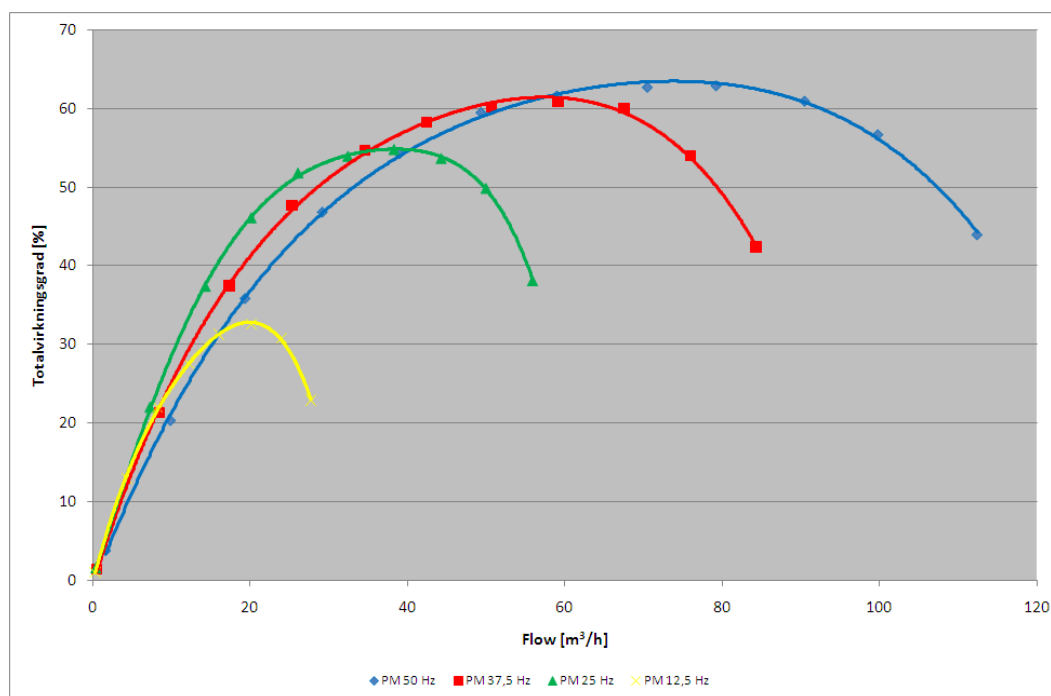
Figur 5.10. Totalvirkningsgrader (pumpe, motor og frekvensomformer) som funktion af volumenstrømmen ved fire forskellige omdrejningstal.



Figur 5.10. Test af NSL 80-215 med PM motor

I figur 5.11 ses totalvirkningsgrader (pumpe, motor og frekvensomformer) som funktion af flowet ved fire forskellige omdrejningstal.

Igen afhænger totalvirkningsgraden i høj grad af flowet. Den højest opnåede totalvirkningsgrad på ca. 63 % er opnået ved 3.000 rpm (50 Hz for motoren).



Figur 5.11. Totalvirkningsgrader (pumpe, motor og frekvensomformer) som funktion af volumenstrømmen ved fire forskellige omdrejningstal.

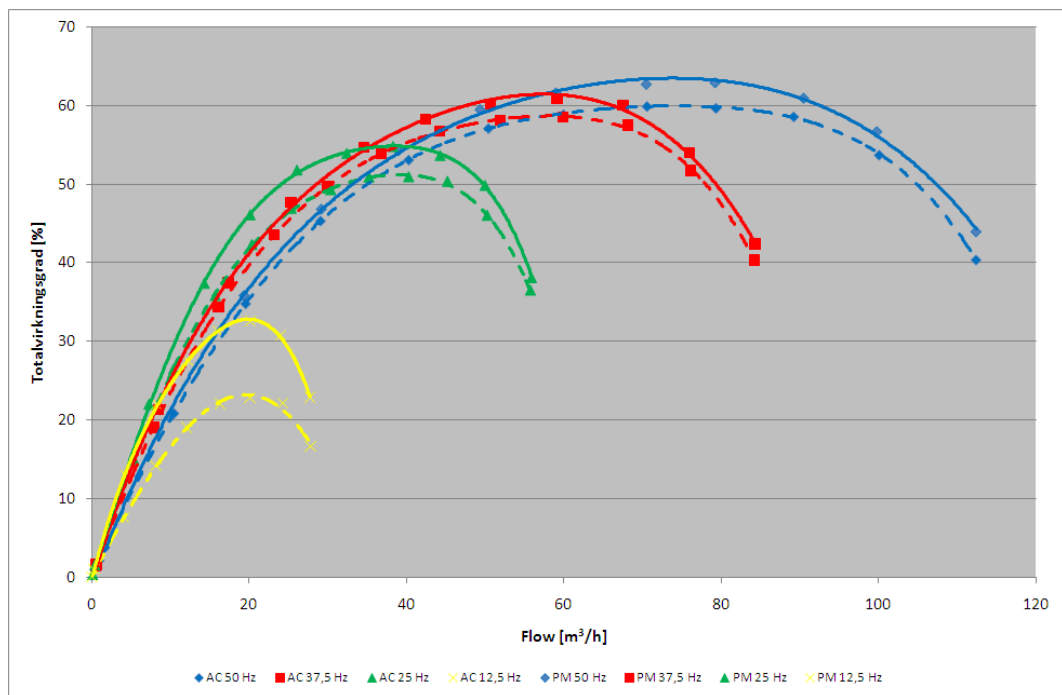
I figur 5.12 ses totalvirkningsgrader for pumpesystemet med henholdsvis asynkronmotor og PM motor. Virkningsgraderne er vist ved fire forskellige omdrejningstal.

Ved 50 Hz ligger forskellene i totalvirkningsgraderne mellem 3 og 4 %. Den største forskel ses ved ca. 75 m³/h.

Ved 37,5 Hz ligger forskellene i totalvirkningsgraderne mellem 2 og 3 %. Den største forskel ses ved ca. 60 m³/h.

Ved 25 Hz er forskellene betydeligt større. Her ligger forskellene mellem 2 og 4 %. Den største forskel ses ved ca. 35 m³/h.

Ved 12,5 Hz er forskellene endnu større. Her ligger forskellene mellem 7 og 10 %. Den største forskel ved ca. 20 m³/h.



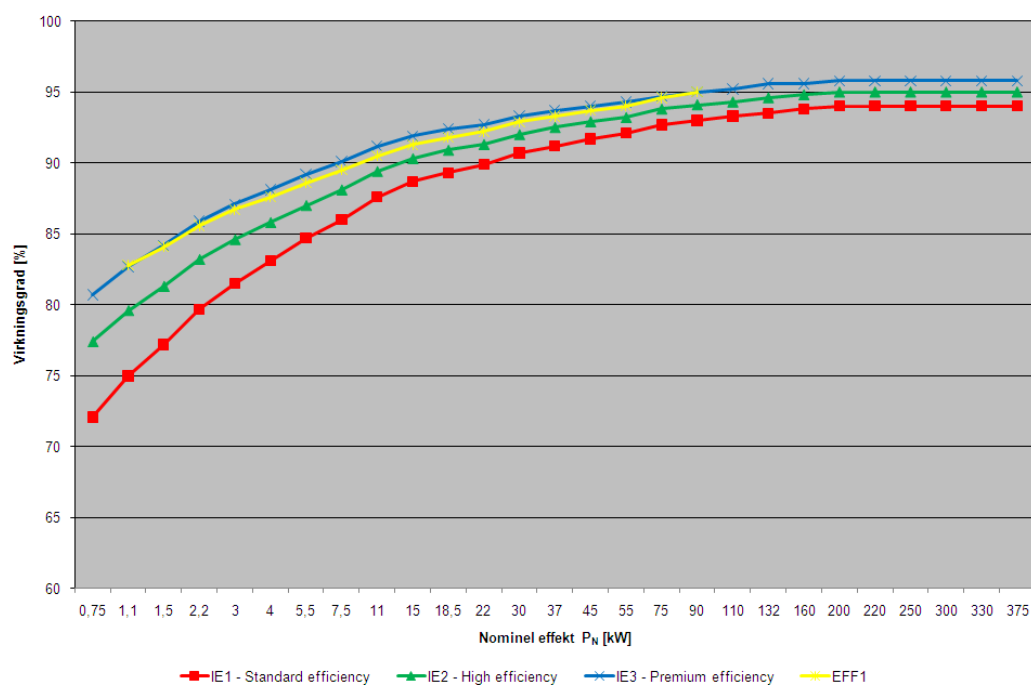
Figur 5.12. Totalvirkningsgrader (pumpe, motorer og frekvensomformer) som funktion af volumenstrømmen ved fire forskellige omdrejningstal

6 Besparelspotentiale ved udskiftning af traditionelle asynkronmotorer med PM motorer

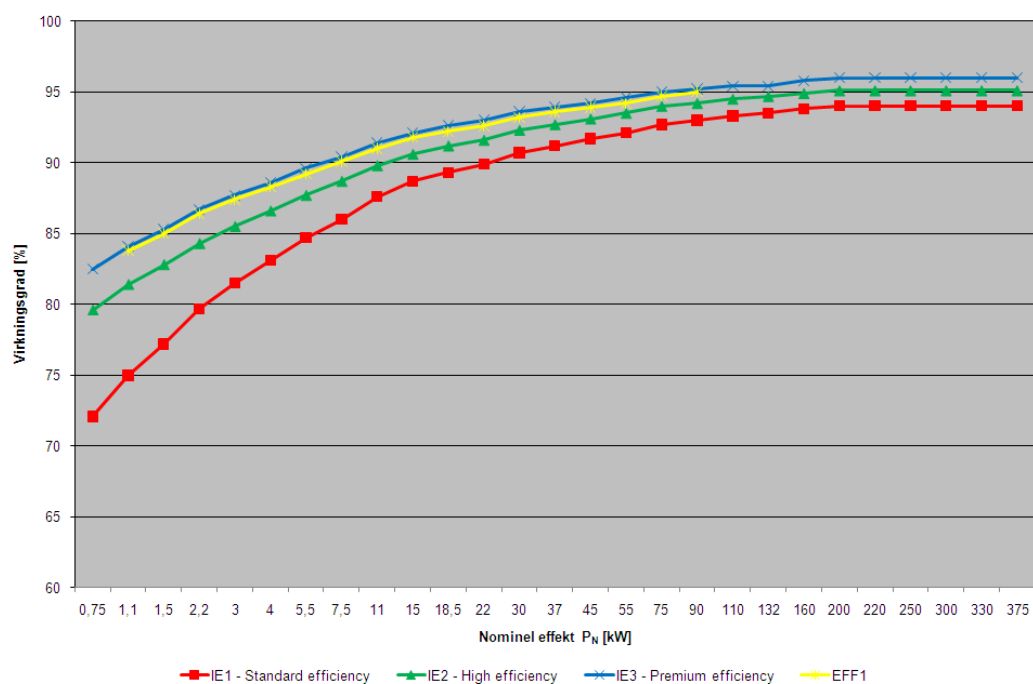
6.1 Indsamling af motordata

Data for EFF1 motorer og PM motorer (virkningsgrader, priser m.m.) er indsamlet via forskellige motorfabrikanter. Disse data ses i de efterfølgende kapitler.

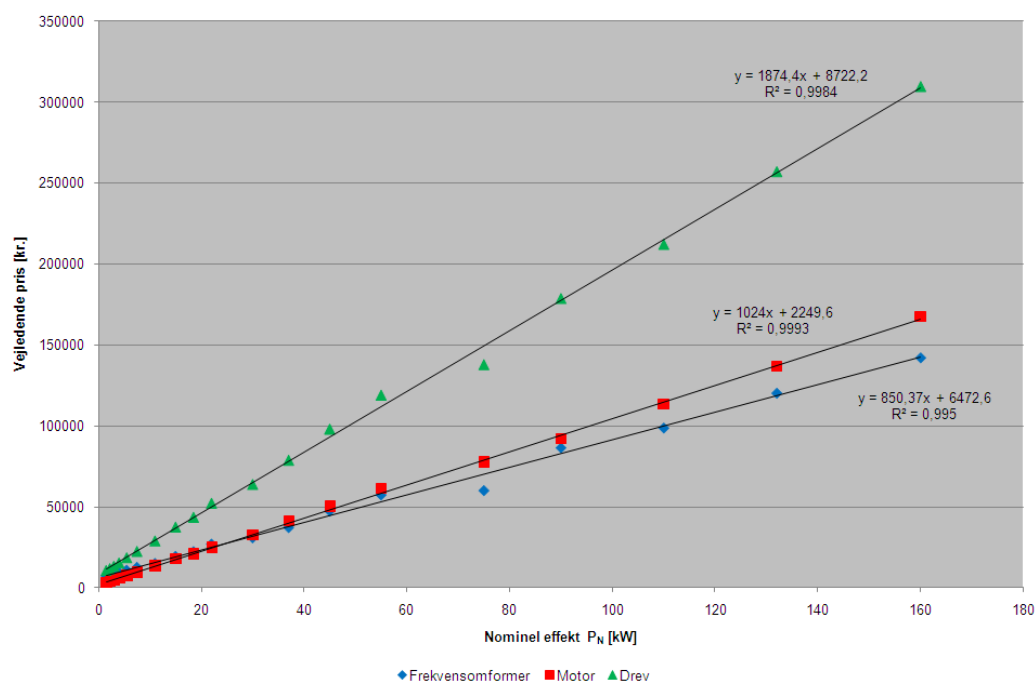
6.1.1 Asynkronmotorer



Figur 6.1. Virkningsgrader for 2-polede motorer i henhold til IE klassifikationen samt EFF1.



Figur 6.2. Virkningsgrader for 4-polede motorer i henhold til IE klassifikationen samt EFF1.



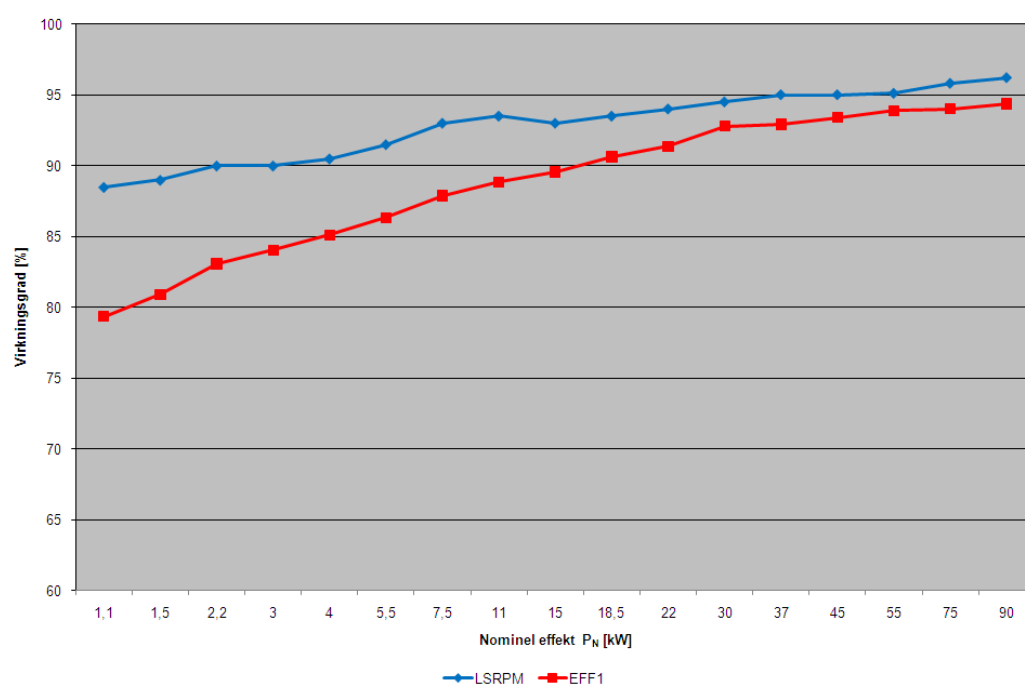
Figur 6.3. Vejledende priser på frekvensomformere, motorer og samlet drev (Kilde: ABB).

6.1.2 PM motorer

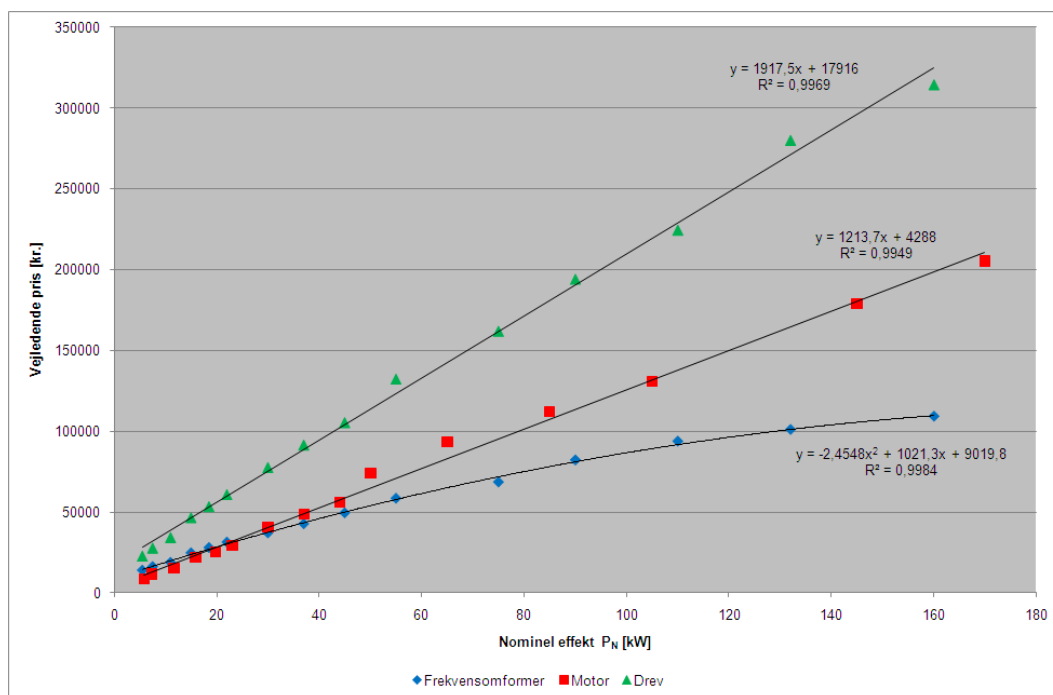
Det er meget svært at finde data for PM motorer, specielt ved delast, men i figurene 6.3 til 6.5 ses virkningsgrader for henholdsvis PM motorer fra den amerikanske motorfabrikant Powertec Motors og en 4 polede sparemotorer.

6.1.2.1 Leroy-Somer

I figur 6.3 ses virkningsgrader for henholdsvis LSRPM drev (motor og frekvensomformer) og 2 polede EFF1 motorer med frekvensomformere. Den største forskel ses for de små og mellemstore motorer (1,1 kW til 11 kW). Hér er forskellen 5 – 8 %. For motorer større end 11 kW er forskellen 3 – 5 %.



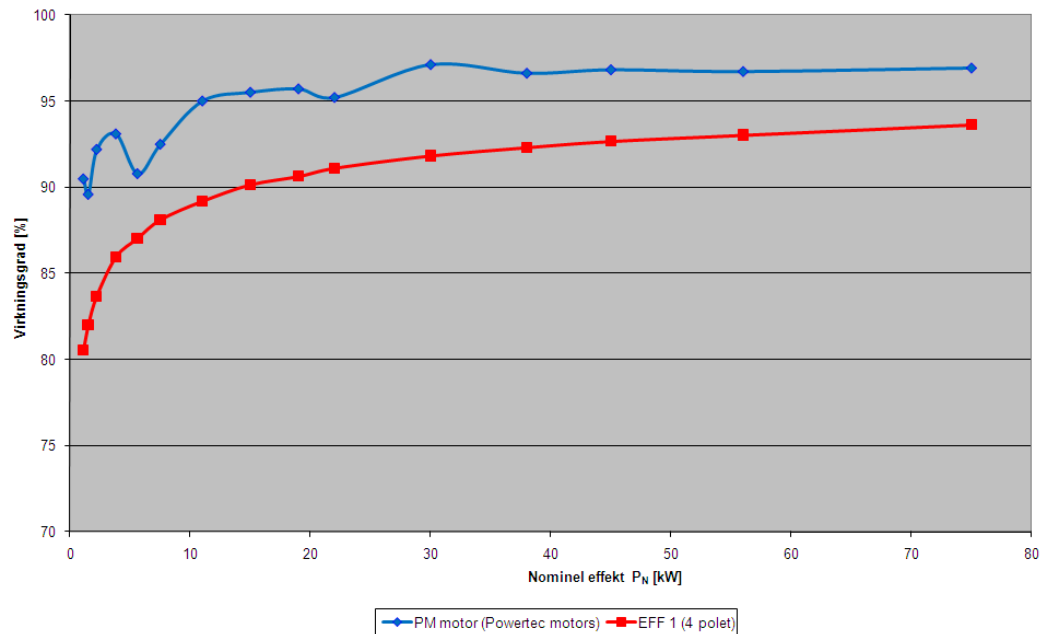
Figur 6.3. Virkningsgrader for henholdsvis LSRPM drev (motorer og frekvensomformer) og 2 polede EFF1 motorer med frekvensomformere.



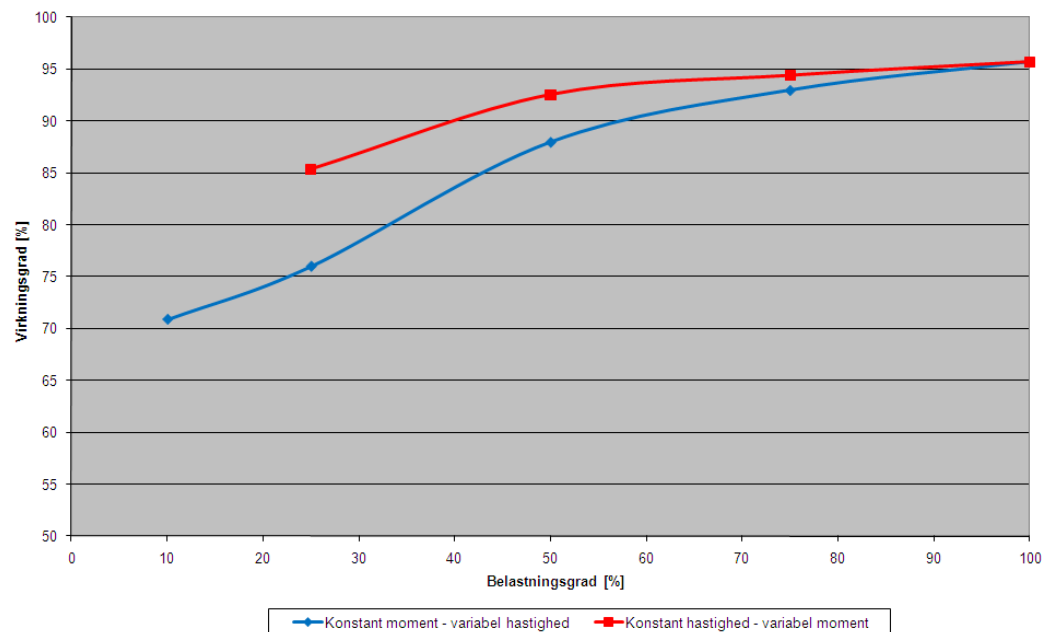
Figur 6.4. Vejledende priser på frekvensomformere, motorer og samlet drev (Kilde: Leroy-Somer).

6.1.2.2 Powertech Motors

I figur 6.4 ses virkningsgrader for henholdsvis Powertec Motors drev (motor og frekvensomformer) og 4 polede EFF1 motorer med frekvensomformere. Virkningsgraderne for PM motorerne er i gennemsnit (set over hele effektområdet) ca. 6 % højere end virkningsgraderne for de 4 polede spærmotorer.



Figur 6.4. Virkningsgrader for henholdsvis PM motorer og 4 polede spærmotorer.



Figur 6.5. Virkningsgrader for henholdsvis PM motorer og 4 polede spærmotorer.

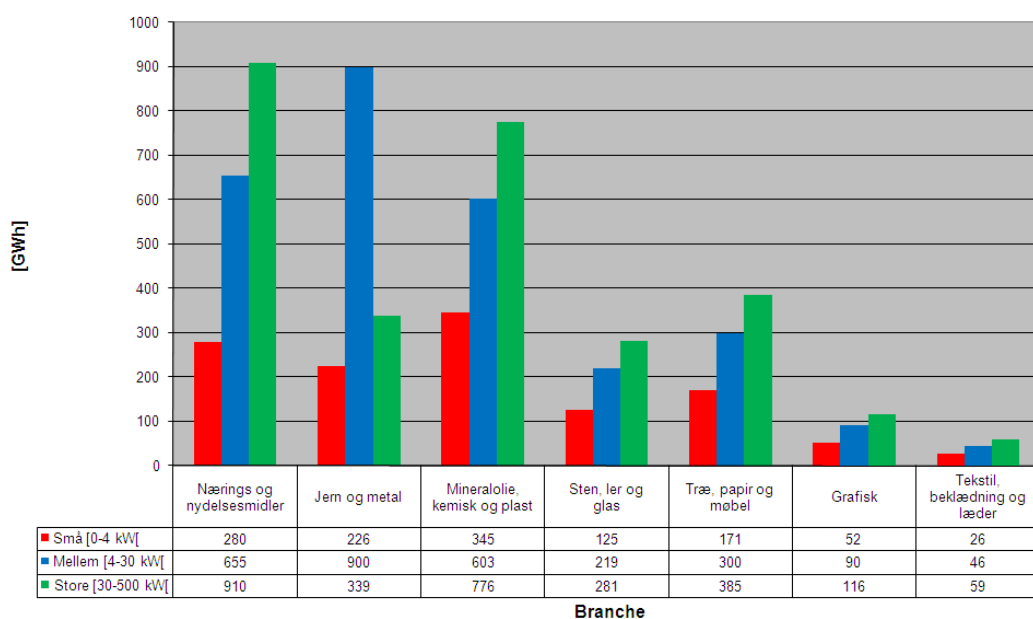
6.2 Besparelspotentiale ved udskiftning

Indenfor teknologiområderne ventilation, pumper, trykluft, køling, hydraulik og anden motordrift er der foretaget en undersøgelse af besparelspotentialet ved udskiftning af traditionelle asynkronmotorer til PM motorer.

I undersøgelsen er elforbruget i de enkelte teknologiområder kortlagt. Dette blev delvist gjort i forbindelse med udarbejdelsen af Den lille Blå om Systemoptimering, men i denne undersøgelse er en nærmere kortlægning af installerede motoreffekter, anvendte motor effektivitets klasser, hvilke reguleringsmetoder der hyppigst benyttes for de enkelte teknologier m.m. foretaget.

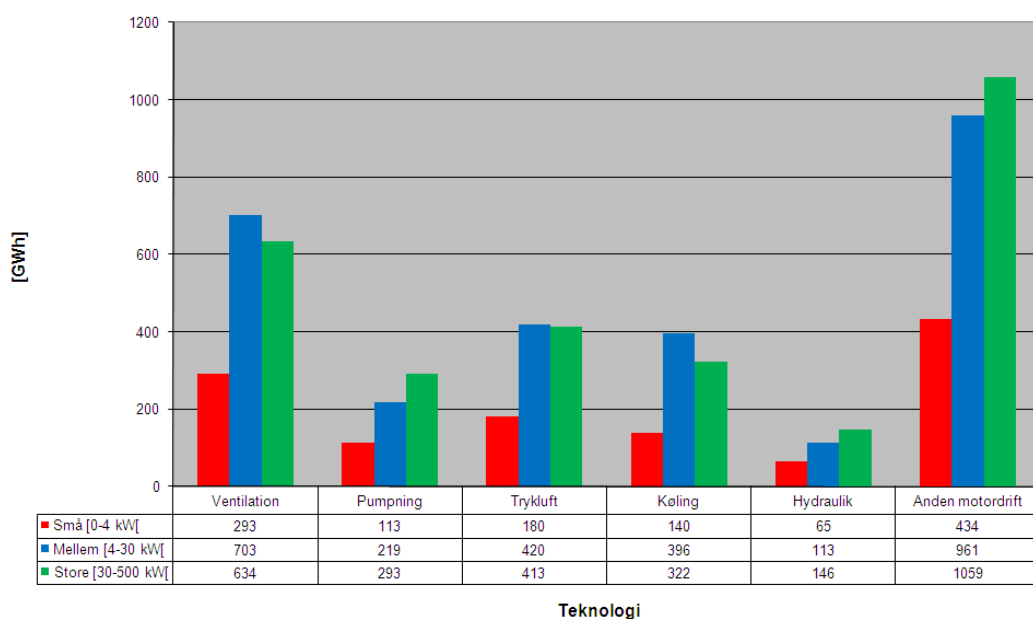
I figur 6.6 ses resultatet af denne kortlægning for de mest betydende brancher i industrien. Kortlægningen er udarbejdet ved hjælp af nedenstående kilder:

- Årlige elforbrug anno 2007, opgjort af Danmarks statistik i 130 branchekategorier. Data er summeret til de syv anvendte hovedbrancher. Nærings- og nydelsesmidler, Jern og metal, Mineralolie, kemisk og plast, Sten, ler- og glas, træ, papir og møbel, grafisk, og tekstil, beklædning og læder. (Se: Andre kilder 17).
- Branchespecifikke elforbrugsfordelinger udtaget fra Enibase/Unitool. For de syv hovedbrancher er udtaget relativ elforbrugsandel for teknologierne ventilation, pumpning, køling, trykluft, hydraulik og anden motordrift. Ud af anden motordrift er udtaget en andel til hydraulik vurderet på basis af tidligere undersøgelser udført af DEFU således at hydraulik også fremstår som en selvstændig teknologi.
- I brancherne Nærings- og nydelsesmidler samt Jern og metal, er tidligere udført detaljerede motorkortlægninger gående bl.a. på teknologianvendelser samt fordeling effektintervallerne imellem. Disse er benyttet som grundlag for en vurdering af energiandelen i tre anvendte effektintervaller – små (0-4 kW), mellem (4-30 kW) og stor (30-500 kW) i disse to brancher. (Se: Andre kilder 7 og 8).
- I de øvrige fem brancher er energiandelen på teknologianvendelser samt fordelingen i de tre effektintervaller baseret på oplysninger i rapporten ”Energibesparelser i erhvervslivet, Delrapport 2, april 2009”. (Se: Andre kilder 12).



Figur 6.6. Kortlægning af elforbruget i de mest betydende brancher i industrien

I figur 6.7 ses de totale elforbrug for de 6 før nævnte teknologiområder fordelt på tre anlægsstørrelser udtrykt i påstemplet mærkepladeeffekt på elmotoren.

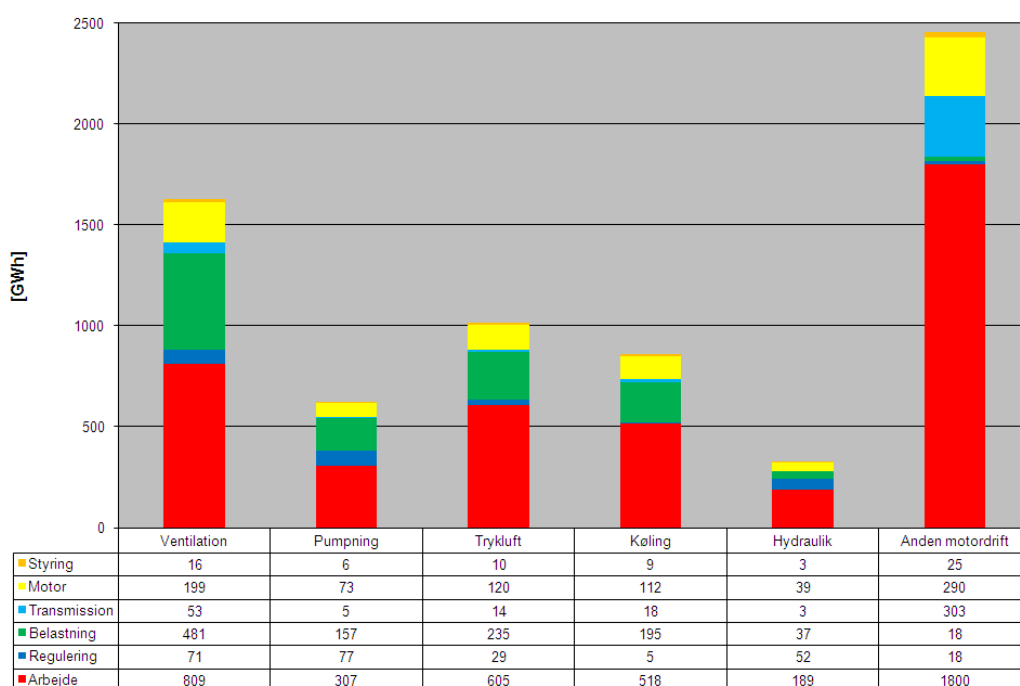


Figur 6.7. Kortlægning af elforbrug til motorer i industrien opdelt på teknologier

I figur 6.8 er vist en estimeret tabsfordeling i systemet (teknologi området) mellem elementerne:

- elektrisk styring
- elmotoren
- transmissionen
- belastningen (kompressoren, ventilatoren m.v.)
- mekanisk regulering (spjæld, drøvleventiler m.v.)

I samme figur er ydermere vist et beregnet reelt arbejde - hydraulisk energi - således at tabselementerne kan sættes i relation.

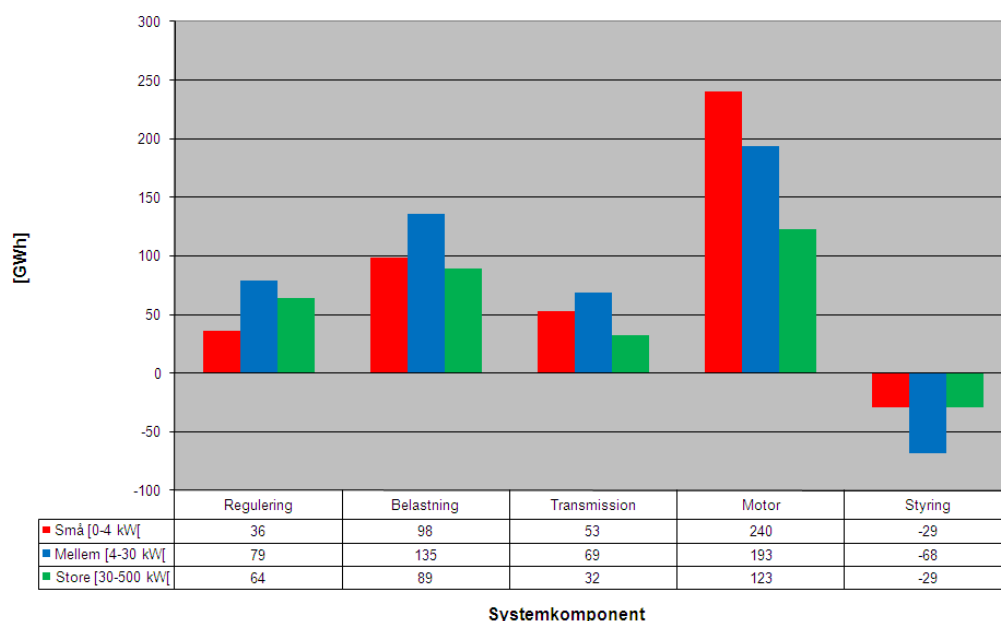


Figur 6.8. Kortlægning af elforbrug på teknologiområder.

I figur 6.8 ses, at 833 GWh skyldes tab i motorerne. Dette svarer til ca. 12 % af elforbruget til motorer i industrien.

Kortlægningen er udarbejdet ved hjælp af de samme kilder, som er anvendt til at udarbejde figur 6.6 og 6.7. Endvidere er rapporterne "Improving the Penetration of Energy-Efficient Motors and Drives" og "Evaluation and Monitoring for the EU Directive on Energy End-Use Efficiency and Energy Services" anvendt. (Se: Andre kilder 15 og 16).

I figur 6.9 ses, at besparelspotentialt ved udskiftning af asynkronmotorer med PM motorer vil udgøre 556 GWh. Dette svarer til en besparelse på ca. 8 % af elforbruget til motordrift i industrien.



Figur 6.9. Besparelspotentialer for systemkomponenter fordelt på små, mellem og store anlæg

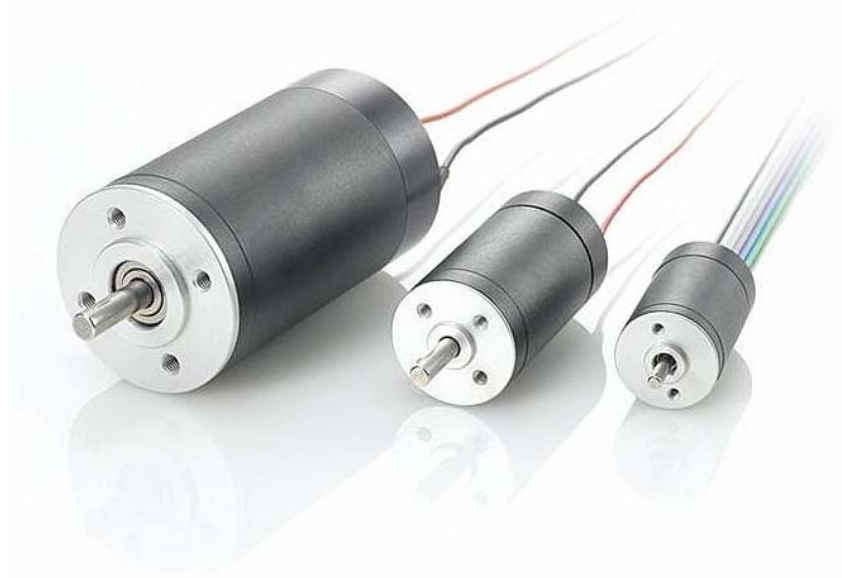
Besparelspotentialerne er udarbejdet ved hjælp af de samme kilder, som er anvendt til at udarbejde figurerne 6.6 til 6.8. Endvidere er data vedr. motorvirkningsgrader fra Leroy Somer samt data fra målingerne på momentbænken (se kapitel 3.1 til 3.3).

PM motorer er ikke kun relevante i industrien. PM motorerne vil f.eks. også kunne anvendes på primært pumpe-, ventilations- og trykluftanlæg i kontor, handels- og servicesektoren, undervisningssektoren, hotel og restaurationssektoren m.m. Totalt set er besparelspotentialet i Danmark således betydeligt større end de 556 GWh.

I figur 6.9 ses ikke kun besparelspotentialet ved udskiftning af asynkronmotorer med PM motorer. I figuren ses også besparelspotentialer ved andre tiltag vedr. systemoptimering, dvs. ved anvendelse af de mest effektive belastningskomponenter (ventilatorer, pumper m.m.) og transmissionskomponenter samt anvendelse af den mest energieffektive udrustning til styring og regulering.

Samlet set ses det, at besparelspotentialet ved systemoptimering vil udgøre 1.086 GWh. Dette svarer til en besparelse på ca. 16 % af elforbruget til motordrift i industrien

7 State og the art i forbindelse med børsteløse permanent magnet motorer



7.1 Abstract

This report contains a study on the state of the art of brushless DC motors. IEEE papers from 1990 to 2009 were investigated. As a result, six main focus points were identified: Control, Design, Modelling, Simulation, Performance and Servo Applications. The aim of the work was to distinguish the trend for each point of focus.

7.2 Foreword

This report is an in depth study of the research literature on Brushless DC motors. It is based on IEEE scientific articles published in the period from 1990 to 2009. The papers retrieved were arranged by year. Each year is reported in its own report/appendix. In appendix 1 of this report a review on 2009 is shown.

Each appendix is structured in 3 sections. The first section sorts the papers under six headings. The second section summarises the numbers of papers sorting under the headings, and the final section lists the papers found for that year. The actual papers are supplied on a DVD for those wishing to consult the original literature.

The main report summarises the numbers of papers sorted under each heading for each year. Colour coding was used to enhance understanding of the information.

7.3 Introduction

All papers were sorted by publication year, and then under the six headings shown below. The number of papers that were sorted under each heading was noted, for each year. The following describes briefly the meaning of each heading.

7.3.1 Control

All Brushless DC Machines require some form of control system to operate. This is because the traditional commutator and brush arrangement is always replaced by power electronics that need controlling. This category encompasses studies of the theory of control methods to improve Brushless DC Drives. Also drive control such as torque, speed, current were also spotted.

7.3.2 Design

Electrical machine design is a complex subject. It encompasses selection of the materials used in the construction and the geometrical arrangement. The exact combination of these may both solve and cause problems. The physical design of the controller, comprising control module and power electronics converter affects both the cost and performance of the complete Brushless DC Motor drive. This category covers the design of the electrical machine and the controller used in Brushless DC drives.

7.3.3 Modelling

By the term ‘Modelling’ we mean mathematical equations describing the function of the Brushless DC Machine and its associated drive system that facilitate the simulation of the steady state and dynamic interaction of the Brushless DC Machine with its power supply and load. There are two basic approaches, analytic and numerical. The term analytic covers those methods that use a collection of simplified and linearised equations to describe the function of the Brushless DC Motor Drive, while the term numerical is used to describe methods including and allied to the finite element method. Through the years, combinations of both approaches have been proposed to obtain quicker calculations or more accurate results.

7.3.4 Simulation

An important aspect of the Brushless DC Motor Drive is the performance. As the controller employed is a power electronics unit, it always uses switching methods. This means that the Brushless DC motor Drive at best operates in a quasi steady-state. This category collects papers proposing and studying a computer implemented model giving simulated results of the performance of the Machine, the controller and/ or the drive system in time.

7.3.5 Performance

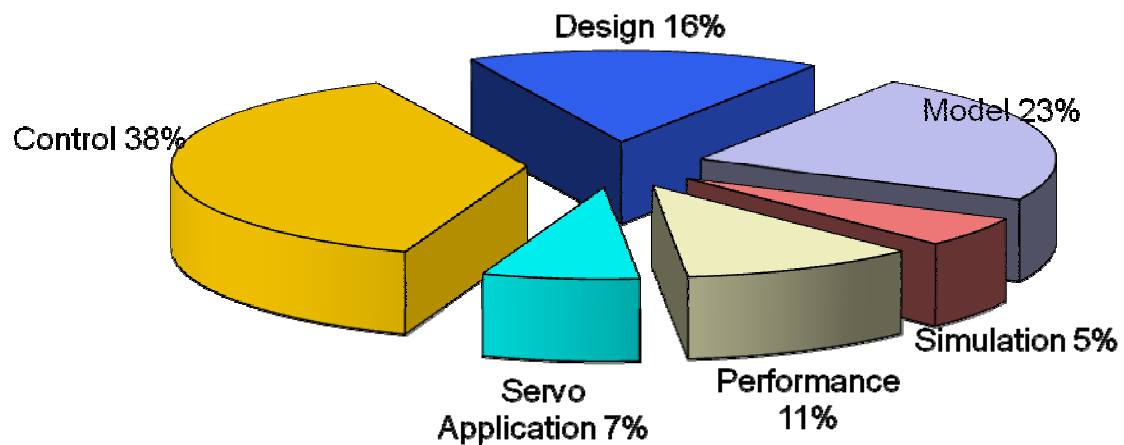
Simulated and measured results, showing efficiency, losses, current, torque, speed etc. under steady state or dynamic load conditions.

7.3.6 Servo Applications

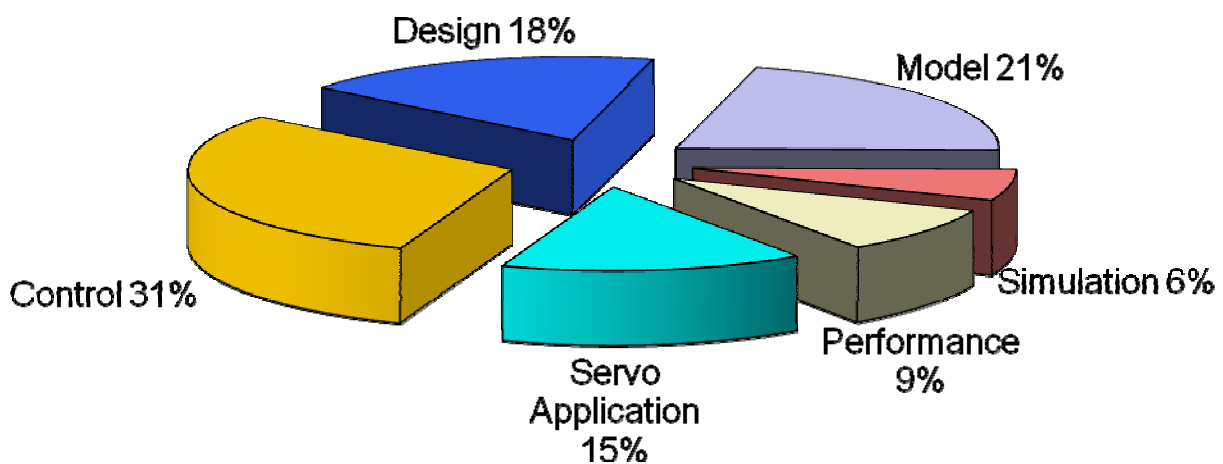
By the term ‘Servo Applications’ we mean applications of Brushless DC Motors, where the torque, speed, and/or position are required to be automatically controlled, independently of the load conditions, within a defined range. By segregating the papers and sorting them under these five headings, we hope to form a coherent picture of the progression of research into Brushless DC Motor Drives, through the years.

7.4 Discussion

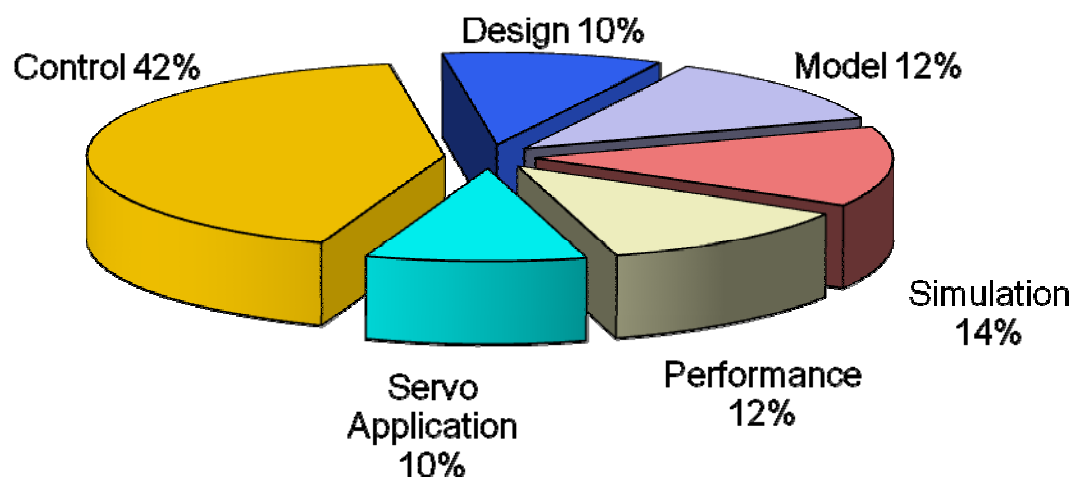
In the following, pie charts representing yearly summaries of Control, Design, Modelling, Simulation, Performance and Servo Applications are shown:



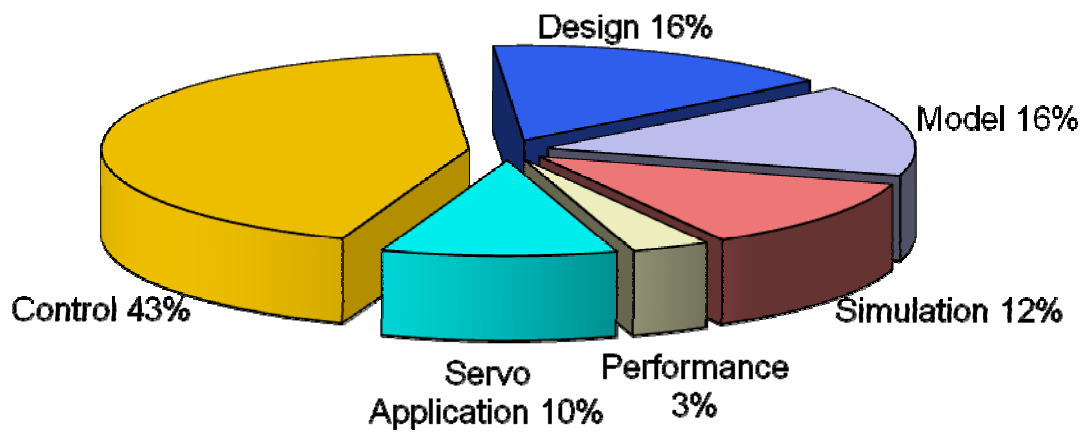
Figur 7.1. 1990



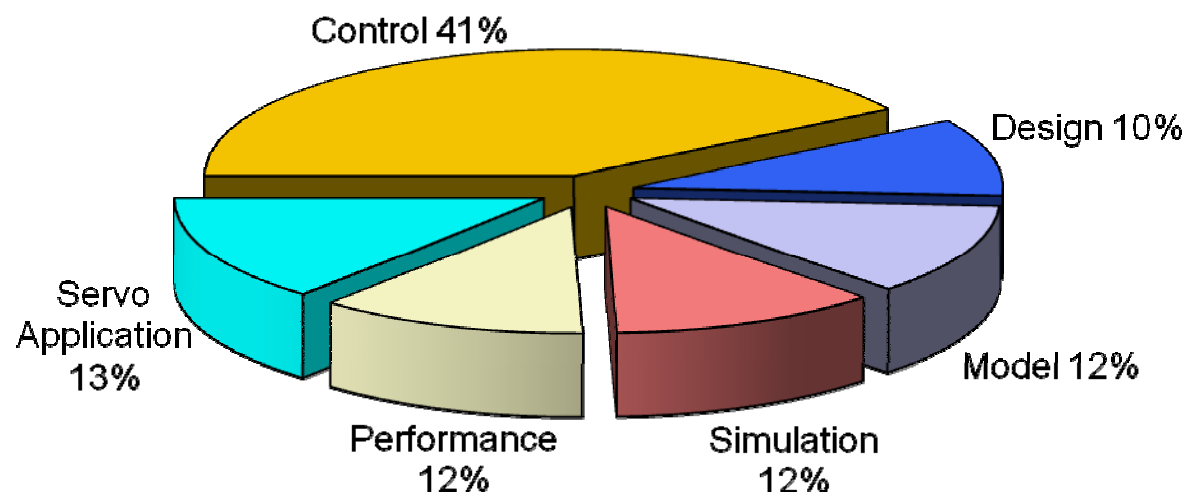
Figur 7.2. 1991



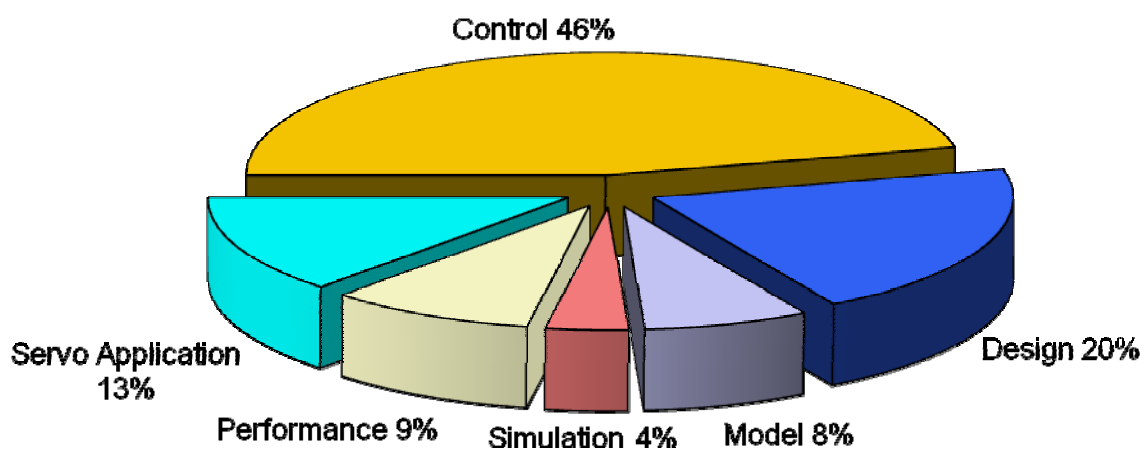
Figur 3. 1992



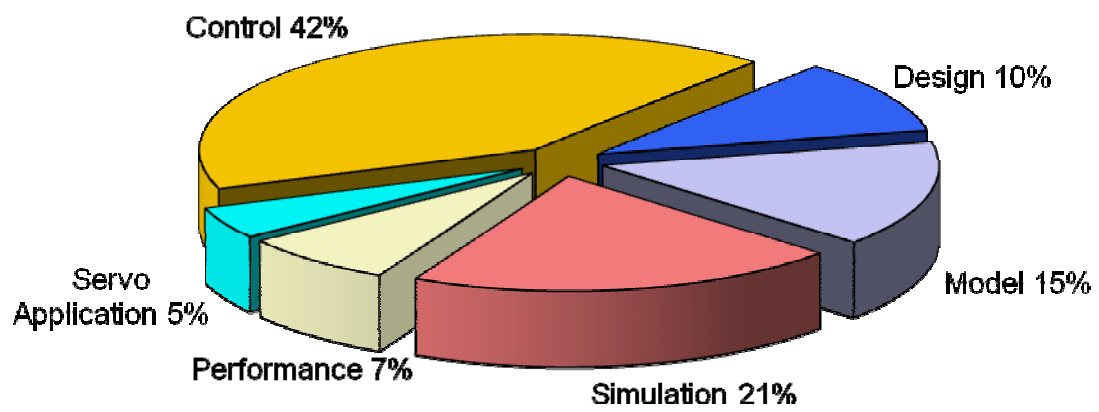
Figur 7.4. 1993



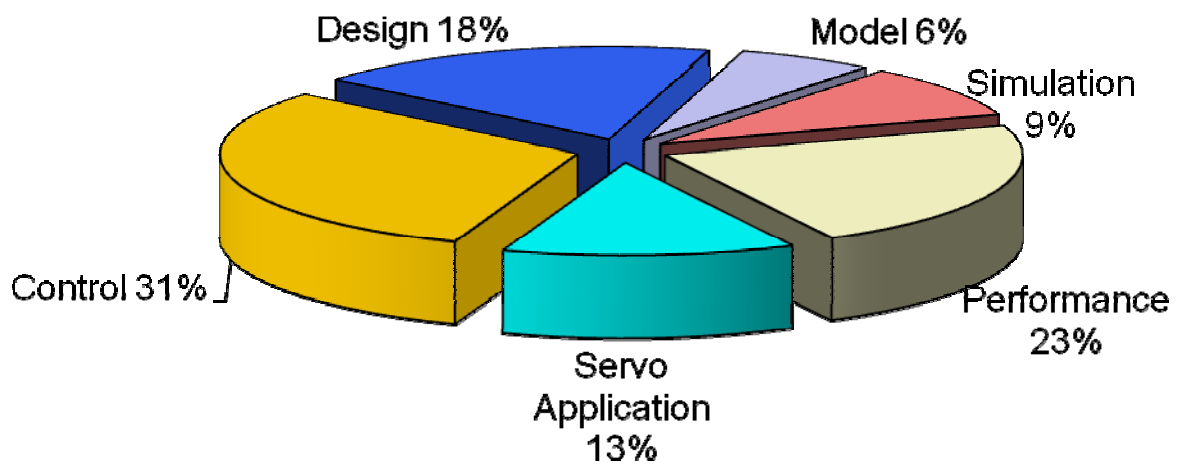
Figur 7.5. 1994



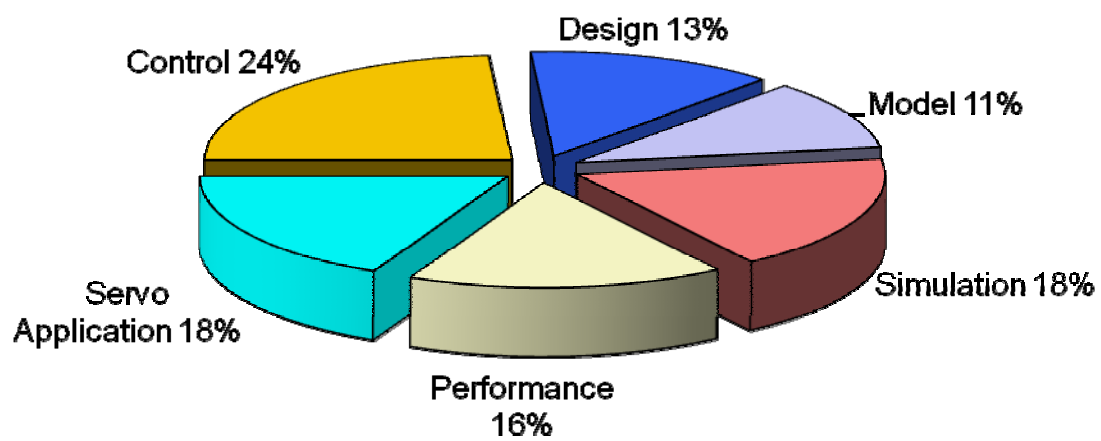
Figur 7.6. 1995



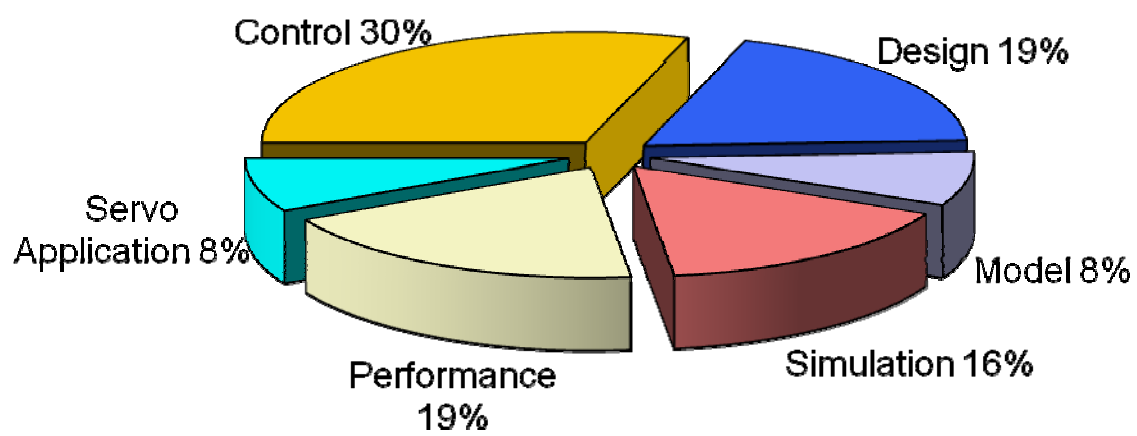
Figur 7.7. 1996



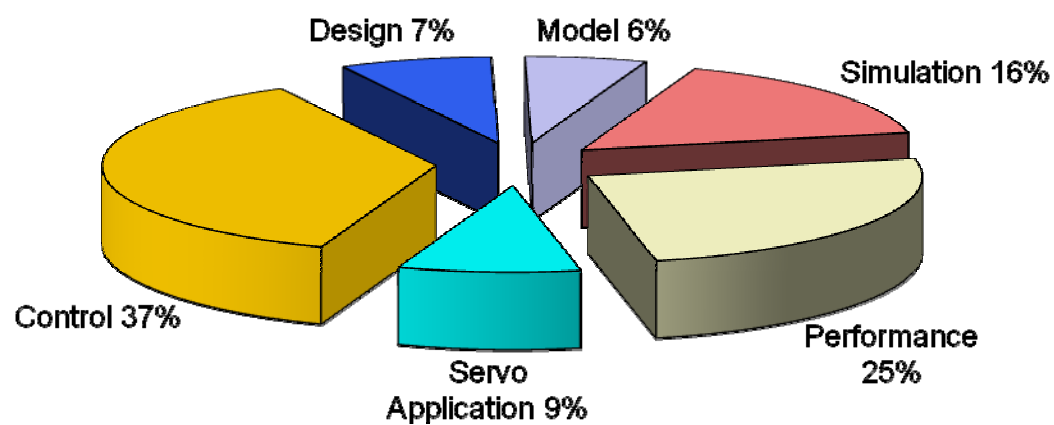
Figur 7.8. 1997



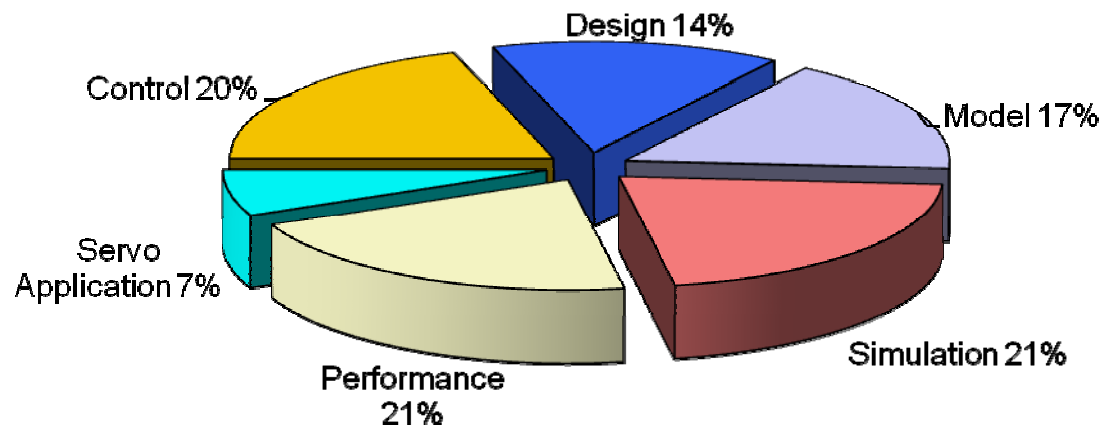
Figur 7.9. 1998



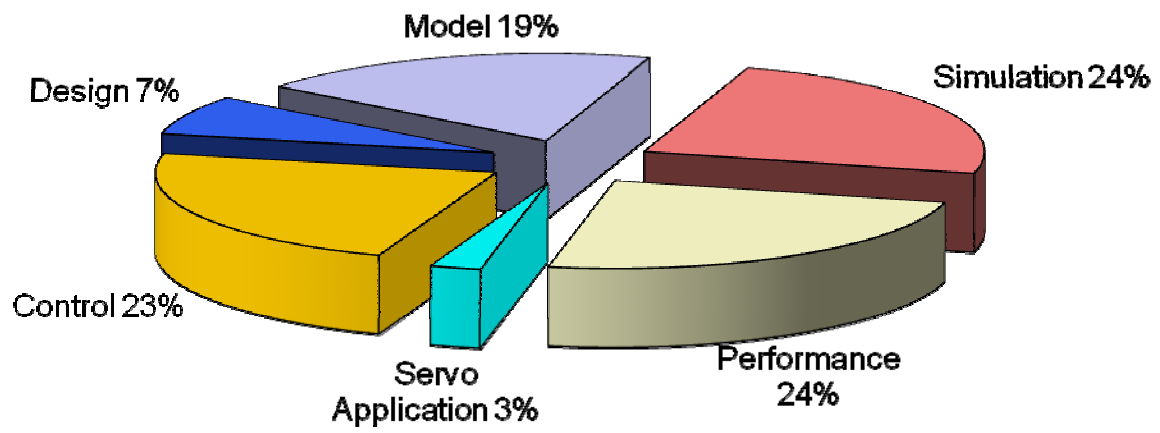
Figur 7.10. 1999



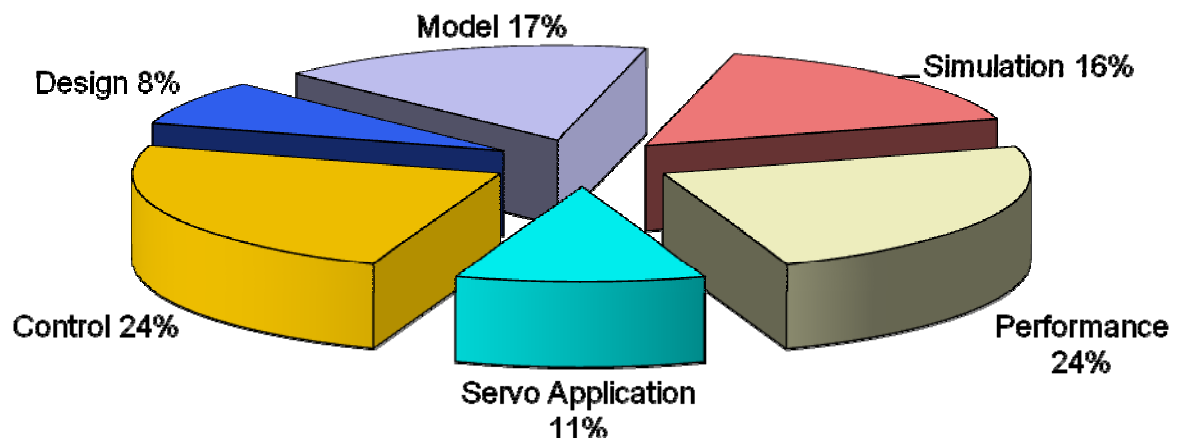
Figur 7.11. 2000



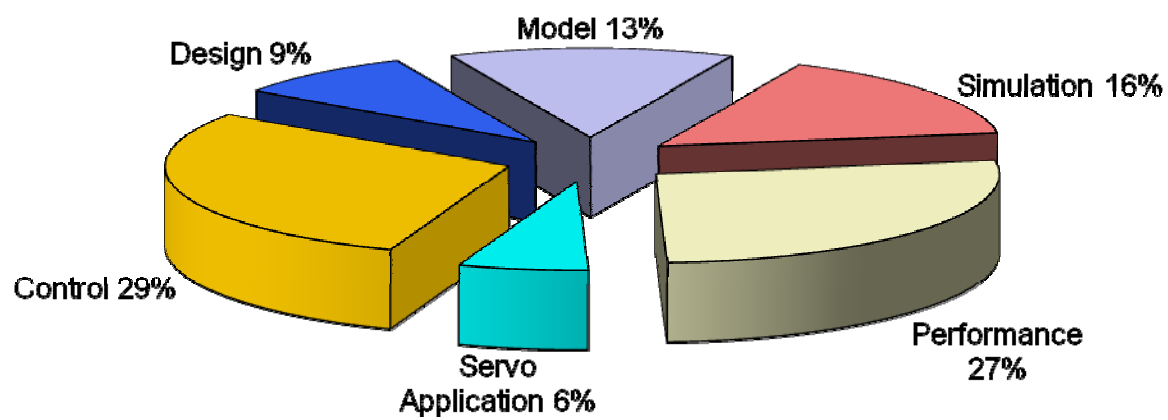
Figur 7.12. 2001



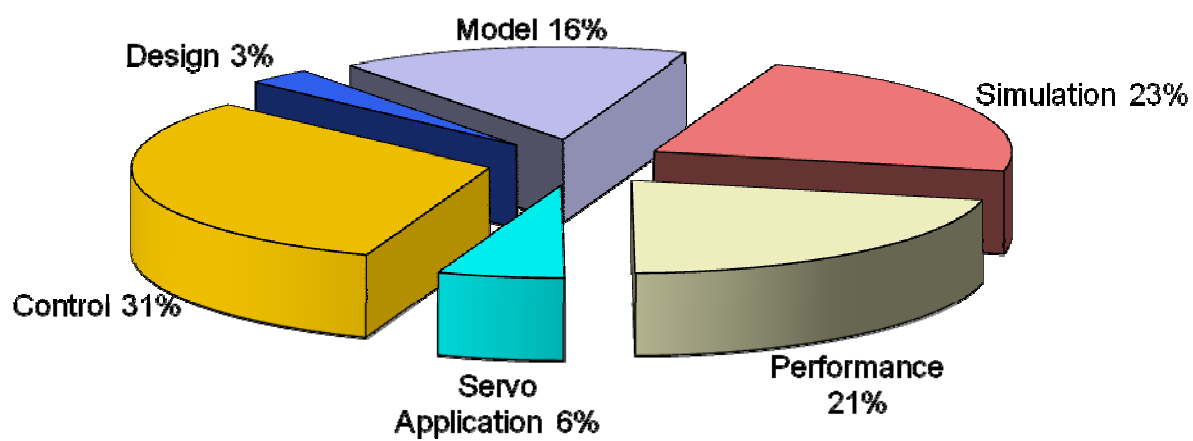
Figur 7.13. 2002



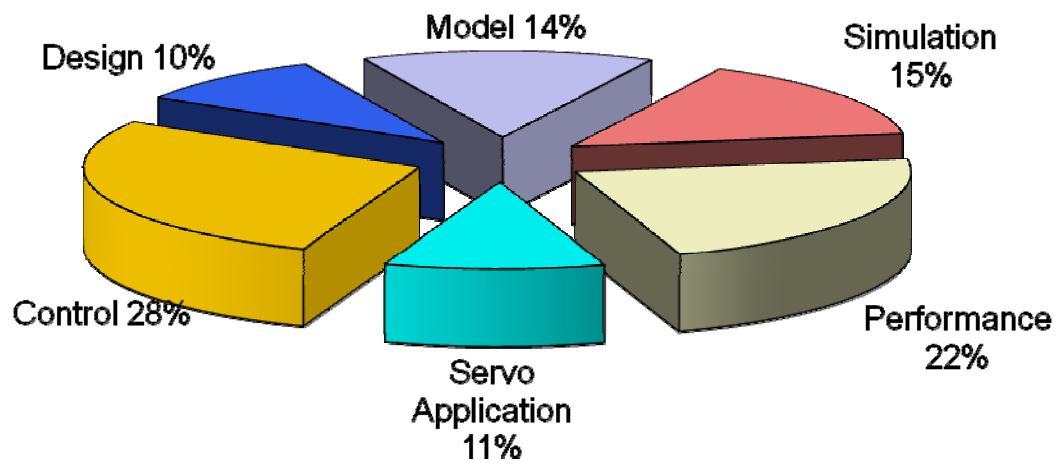
Figur 7.14. 2003



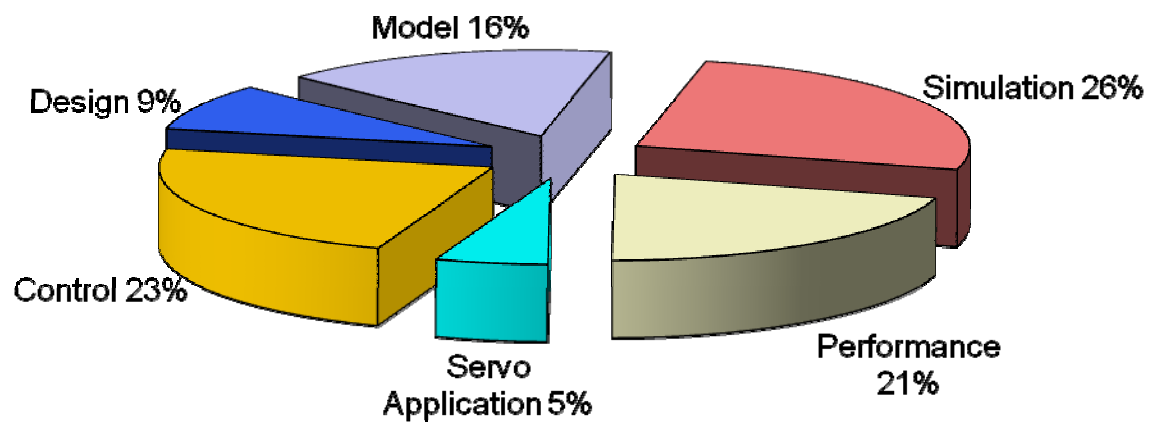
Figur 7.15. 2004



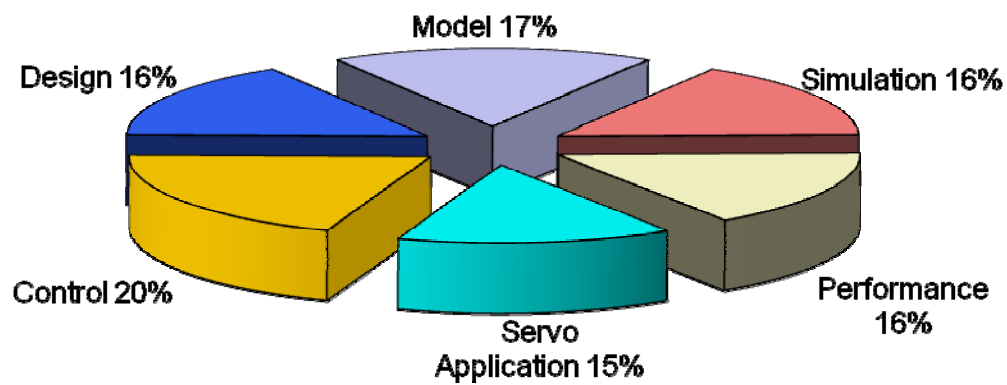
Figur 7.16. 2005



Figur 7.17. 2006



Figur 7.18. 2007



Figur 7.19. 2008

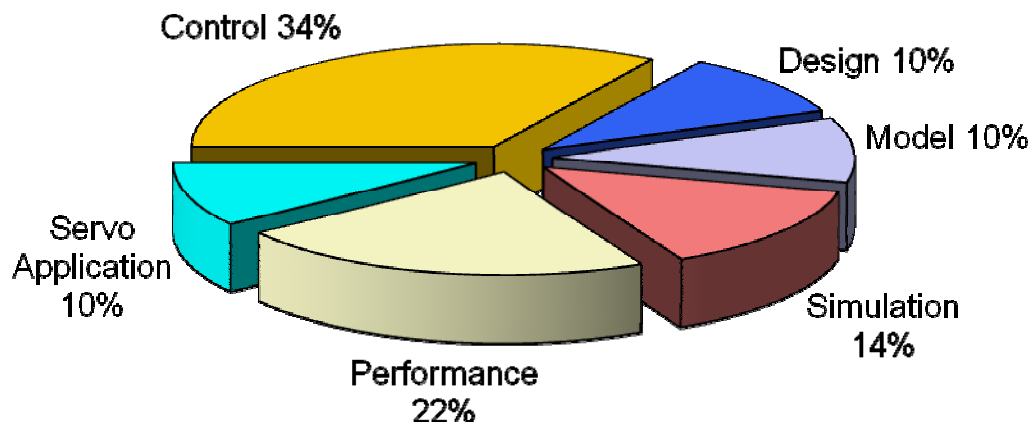
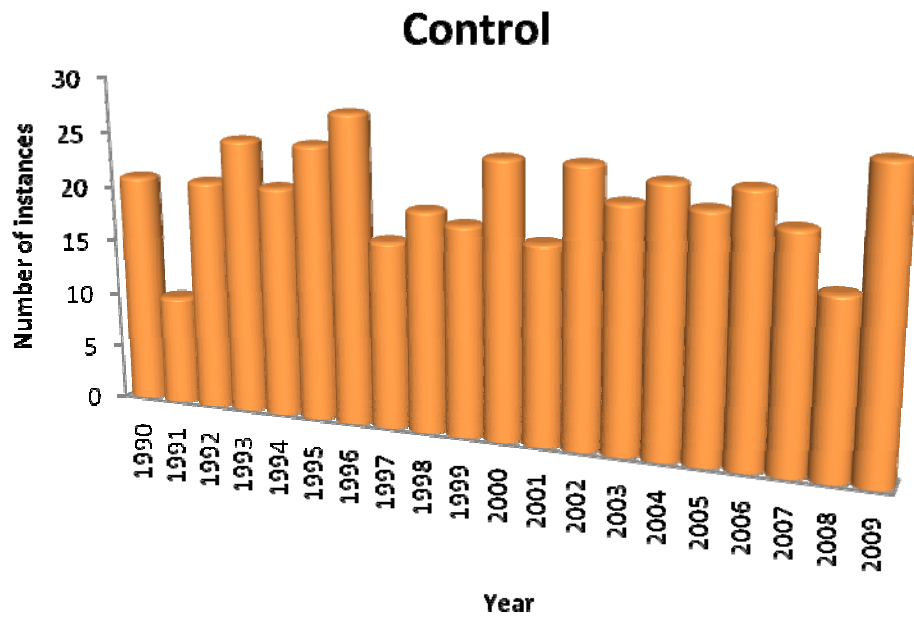
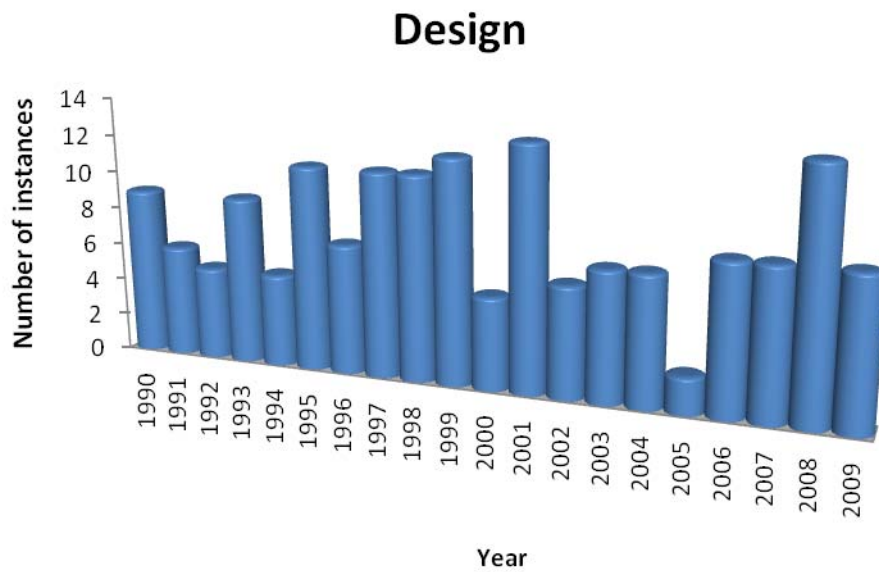


Figure 7.20. 2009

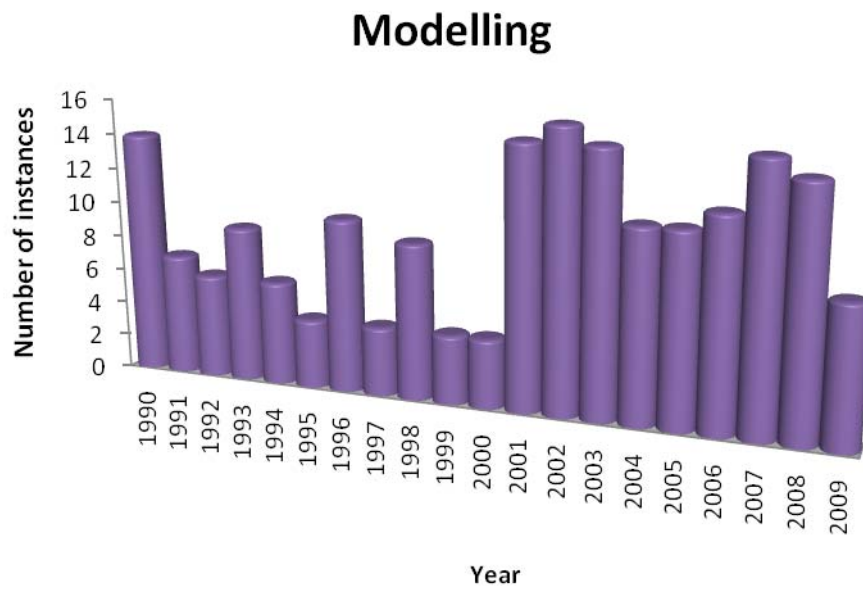
A subject based chart is presented for every focus point for all years of interest. In this way it is possible to discern the development of interest with passing years:



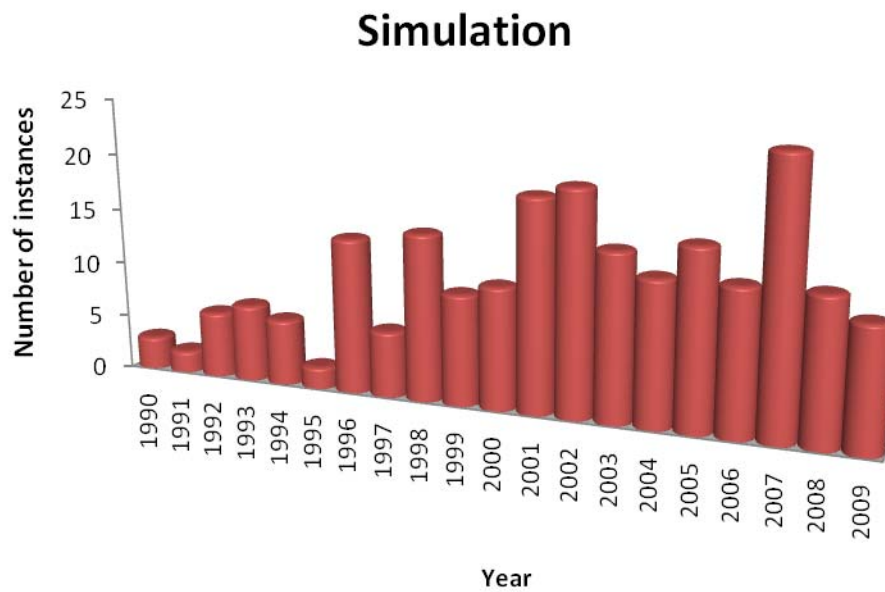
Figur 7.21. Number of papers involving Control issues



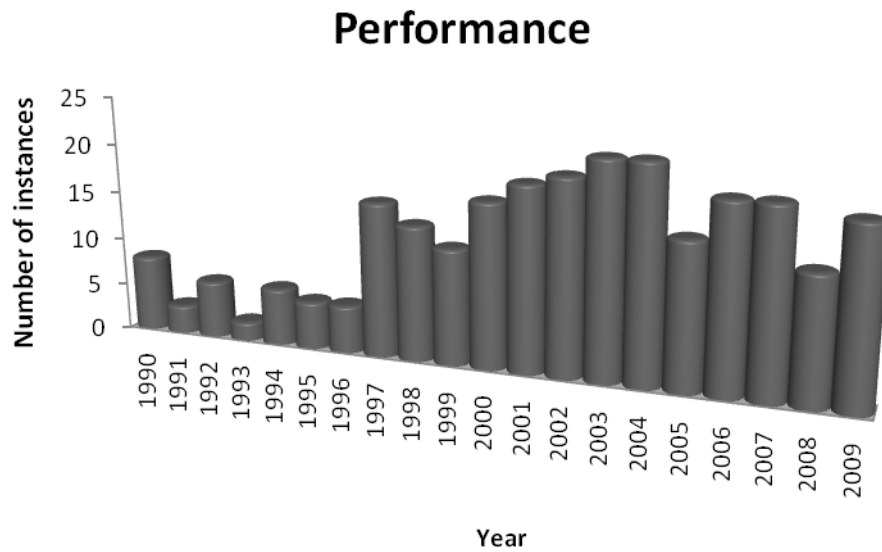
Figur 7.22. Number of papers involving Design issues



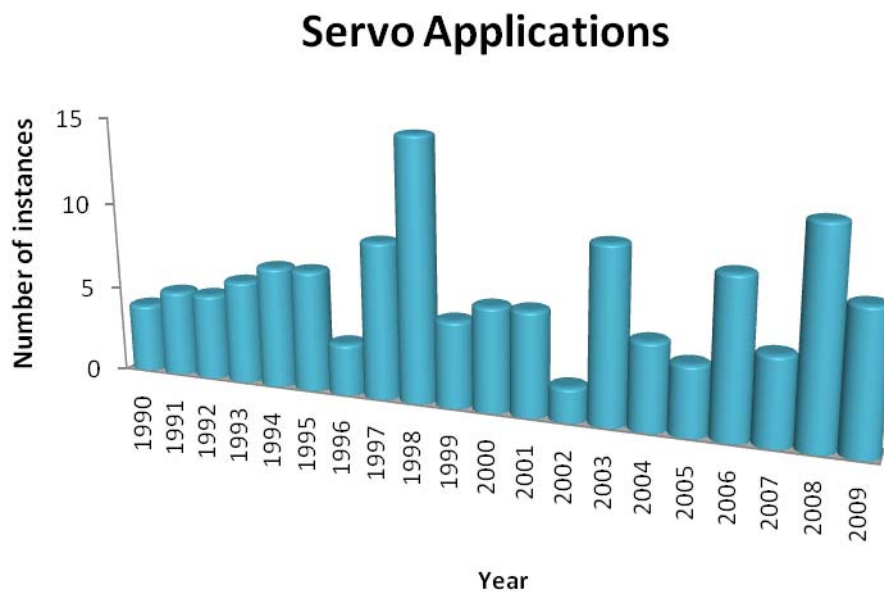
Figur 7.23. Number of papers involving Modelling



Figur 7.24. Number of papers involving Simulation issues



Figur 7.25. Number of papers involving Performance issues



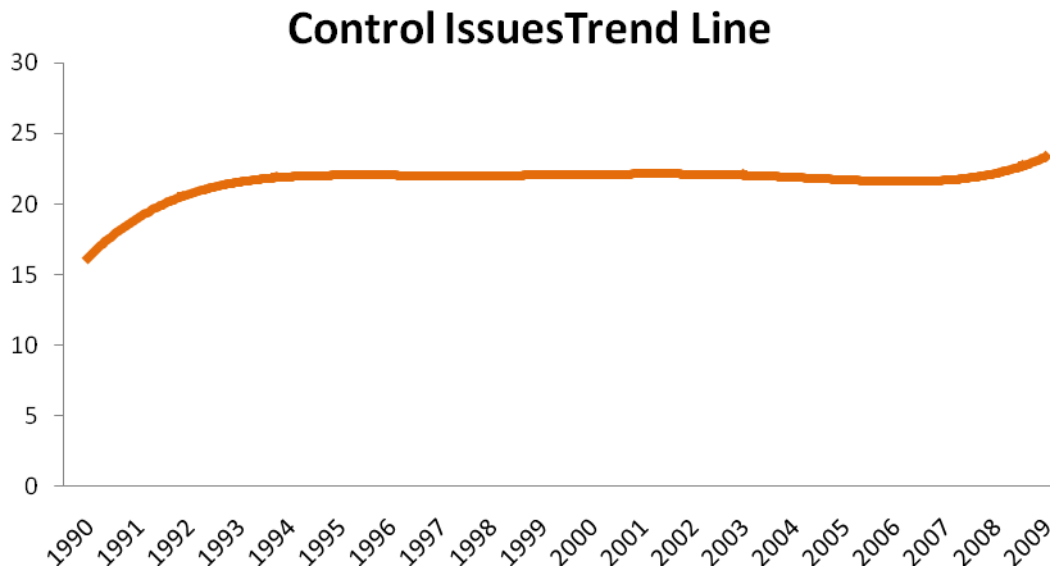
Figur 7.26. Number of papers involving Servo Applications

Conclusions

For each year, 40 papers were investigated for focuses. An exception, 1991 (having 23 papers) has occurred due to the fact that the source (IEEEExplore) could not provide sufficient papers of a relevant status.

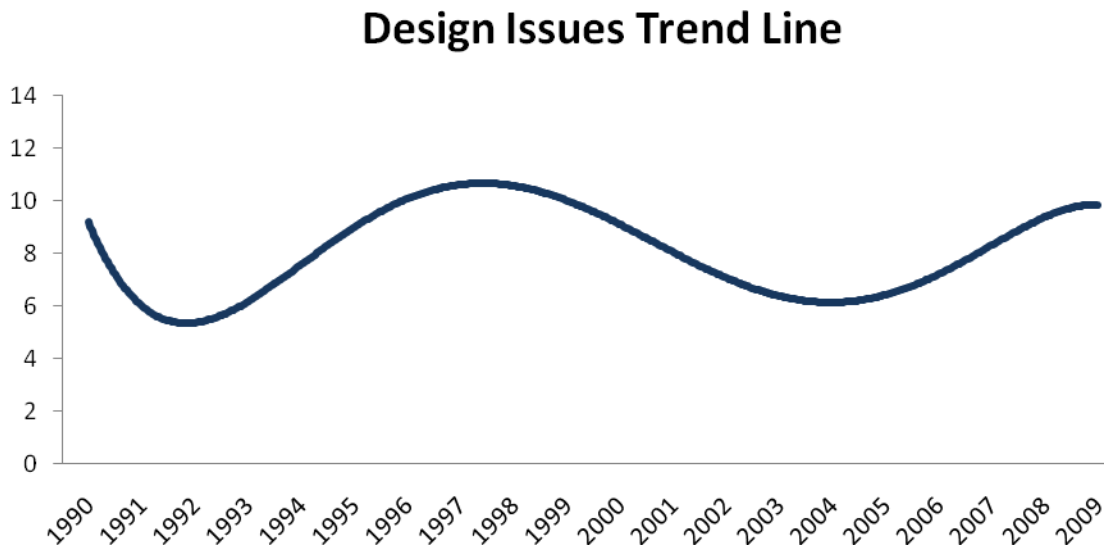
The pie charts in figures 1 to 20 present an overview of each year. The column charts of figures 21 to 26 present the actual development of each focal point of interest. However, these are a little confusing. To present this development in a rational manner, a trend line was drawn for each focal

point. These are presented in figures 27 to 32. The curves were obtained by extrapolating the number of instances by a 5th order polynomial expression.



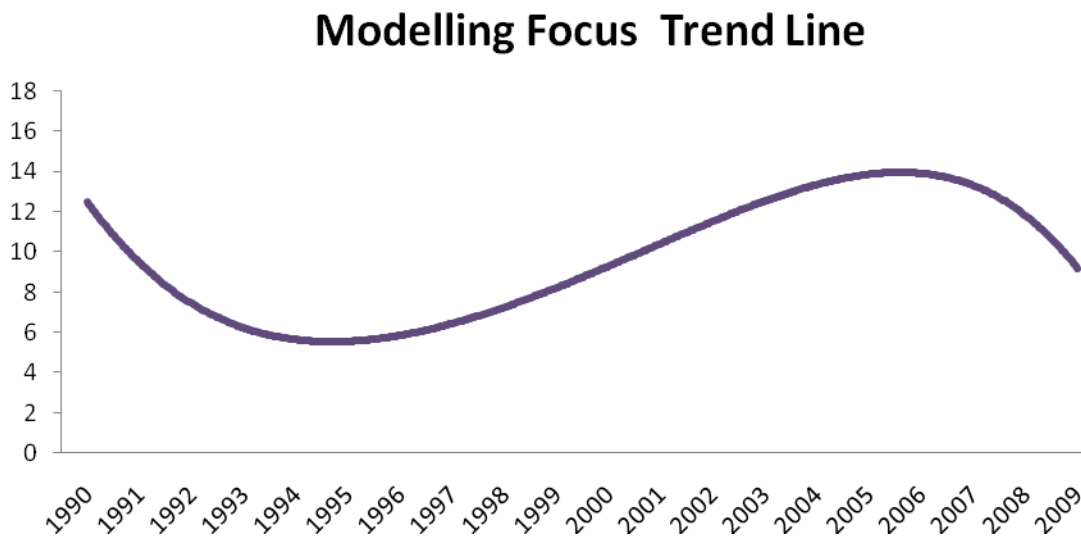
Figur 7.27. Number of papers involving Control issues vs. Time

From figure 7.27, it may be seen that control issues were present in an average of 22 papers out of 40, building up from 21 in 1990 and increasing slightly to around 27 in 2009.



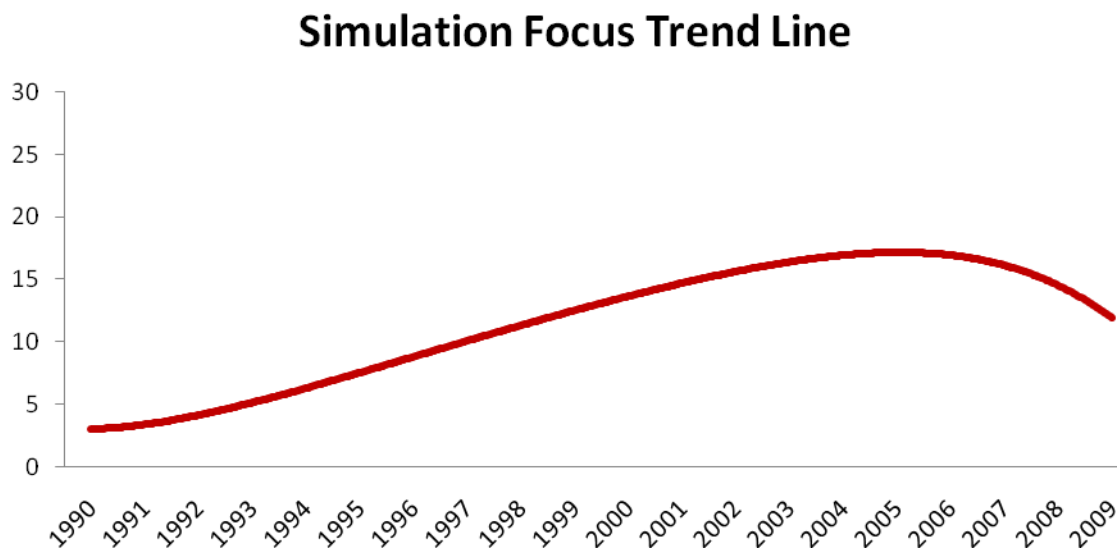
Figur 7.28. Number of papers involving Design issues vs. Time

From figure 7.28, it may be seen that the interest in design issues has fluctuated from about 6 to 10 papers out of 40 of the applied research effort, being about 5 in 1992, and showing an increasing trend to about 10 in 2009.



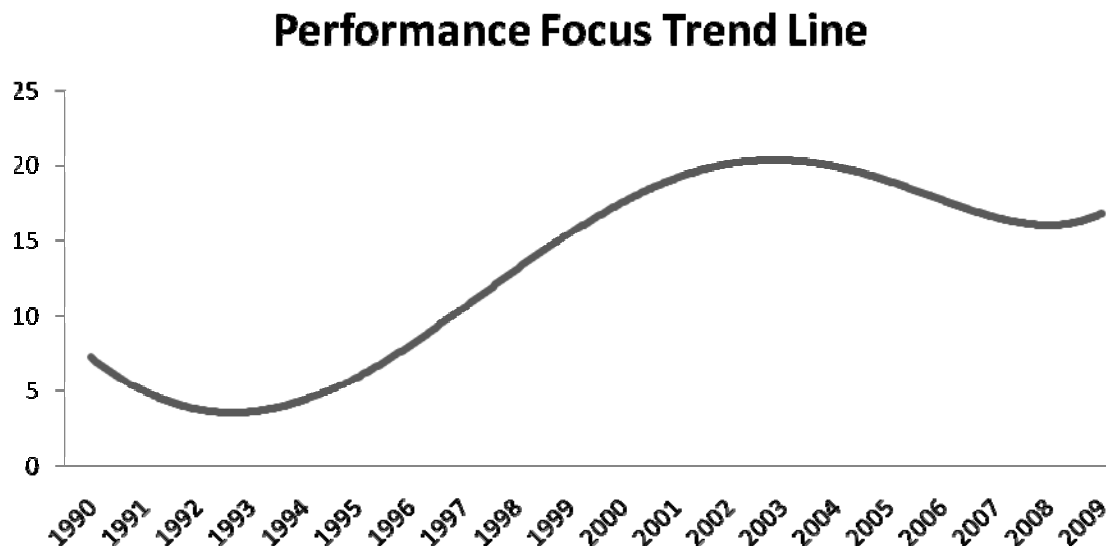
Figur 7.29. Number of papers involving Modelling vs. Time

From figure 7.29, it may be observed that focus on modelling issues has fluctuated from about 6 to 14 papers out of 40 of the applied research effort, being about 5 in 1994, and showing an increasing trend to about 14 in 1995.



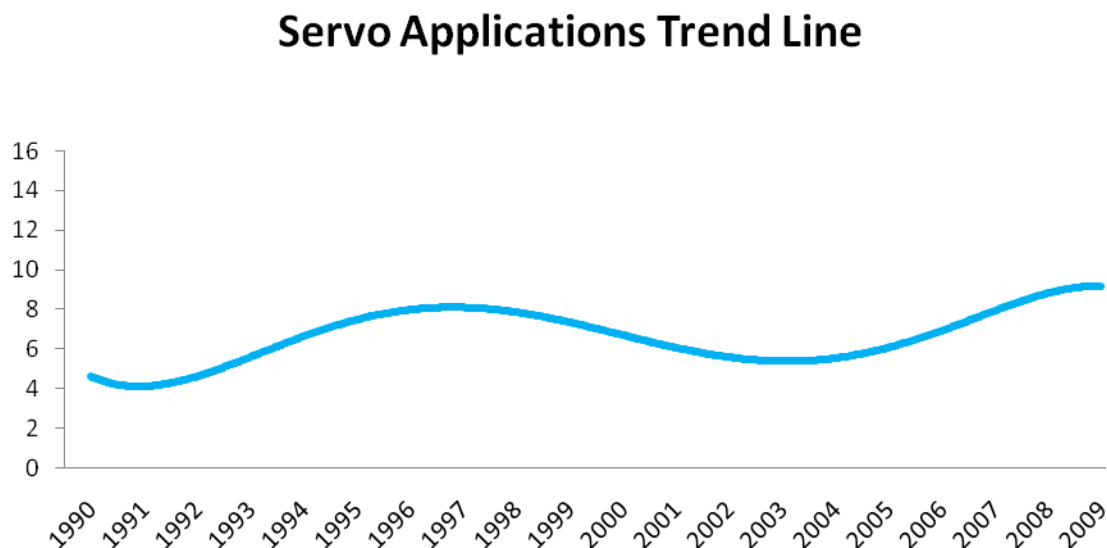
Figur 7.30: Number of papers involving Simulation issues vs. Time

From figure 7.30, an increased interest in simulation was encountered in the 2nd interval of the studied period. The peak was reached around 2007 (24 papers out of 40). The lowest interest (3 papers out of 40) was encountered in 1990.



Figur 7.31. Number of papers involving Performance issues vs. Time

Figure 7.31 shows an increased focus on performance issues in the early 2000s. Around 2009, a slight rise tendency in interest was observed.



Figur 7.32. Number of papers involving Servo Applications vs. Time

As depicted in figure 7.32, servo-systems have been focused on at an average of 7 papers out of 40 throughout the interval.

Contents of the DVD disk (see chapter 7.2):

- PDF files of papers referred to in this project
- Source DOC and EXCEL files for this project
- Final PDF files of source DOCs
- Additional bibliography on the brushless dc machine

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/ Kortlægning af motorbestanden i nærings- og nydelsesmiddelindustrien, Teknisk rapport 411, DEFU, 1998,
Hans Henrik Hansen (DEFU)
- /8/ Kortlægning af motorbestanden i jern- og metalindustrien, Teknisk rapport 397, DEFU, 1998, Hans Henrik Hansen (DEFU)
- /9/ 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
- /10/ Opslagsværk over remtransmissioners karakteristika og energieffektivitet, TR 430, DEFU 1999. Lars Bjerre (DEFU) og Thomas Perch Nielsen (Teknologisk Institut)

- /11/ Kortlægning af erhvervslivet energiforbrug, november 2008.
Mogens Johansson, Dansk Energi Analyse A/S og Maria Rizzo, Viegand & Maagøe ApS
- /12/ Energibesparelser i erhvervslivet, Delrapport 2, april 2009.
Mogens Johansson, Dansk Energi Analyse A/S og Peter Maagøe Petersen, Viegand & Maagøe ApS
- /13/ Elbesparelser gennem forbedret grundlag for projektering af elmotorer. DEFU TR 352.
Oktober 1995. Anders Varming Rebsdorf, Vestas A/S og Hans-Henrik Hansen, DEFU.
- /14/ EUP Lot 11 Motors, Final, ISR- University of Coimbra, 18th February 2008.
Aníbal T. de Almeida, Fernando J. T. E. Ferreira, João Fong and Paula Fonseca.
- /15/ Improving the Penetration of Energy-Efficient Motors and Drives, SAVE, 2000.
Contractor: ISR – University of Coimbra (Portugal)
Participants: EDF(France), ENEL(Italy), ETSU(U.K.), FhG-ISI(Germany), NESA(Denmark)
- /16/ Evaluation and Monitoring for the EU Directive on Energy End-Use Efficiency and Energy Services. EMEES bottom-up case application 13: Variable speed drives.
ISR- University of Coimbra, 30th April 2009, Aníbal T. de Almeida, Paula Fonseca and Tiago Fernandes.
- /17/ Statistisk Årbog 2009, Danmarks Statistik, juni 2009.
Redaktion: Stefan Jul Gunnarsen og Margrethe Pihl Bisgaard.
ISBN: 978-87-501-1755-1 (internet-udgave)
- /18/ Gaizka Ugalde Rosillo: *Study on Concentrated Windings Permanent Magnet Machines for Direct Drive Applications*; PhD Thesis; University of Mondragon; 2009

Hjemmesider

ELFORSK

www.elforsk.dk

Dansk Energi

www.danskeenergi.dk

Teknologisk Institut

www.teknologisk.dk

Aalborg Universitet

www.aau.dk

Leroy Somer

www.leroy-somer.dk

Øland
www.oeland.dk

Desmi
www.desmi.dk

Motron
www.motron.dk

4E - Electric Motor Systems Annex EMSA
<http://www.motorsystems.org/>

EcoMotors (Eco-design directive for electric motors)
<http://www.ecomotors.org/>

EEMODS (Energy efficiency in motor driven systems)
<http://www.eemods09.fr/>

SEEEM (Standards for Energy Efficiency of Electric Motor Systems)
<http://www.seeem.org/news.php>

CEE (Motor and Motor Systems Programs)
<http://www.cee1.org/ind/mot-sys/mtr-ms-main.php3>

EuroDEEM (The European Database for Efficient Electric Motors)
<http://sunbird.jrc.it/energyefficiency/eurodeem/index.htm>

Danmarks Statistik
<http://www.dst.dk/>

Brushless DC Machines

Review on

The year '2009' is rendered in a large, bold, teal-colored font with a thick black outline. The digits are slightly irregular, giving it a hand-drawn or stylized appearance. Below the numbers, there are faint, light blue horizontal lines that appear to be part of a larger graphic or watermark.

Control	(1) [1] - single current sensor control (2) [2] electric brake, energy regeneration, electric vehicle (EV) (3) [3] – High speed BLDC, robots and medical applications (4) [6] - adaptive position tracking control, neural control (5) [7] – position control (6) [8] - Adaptive fuzzy control, State feedback, Output feedback State observer, Field-oriented induction motors (7) [9] - Automatic phase advance adjustment, single-phase BLDC motor. (8) [10]- field-programmable gate arrays (FPGAs), inverters, motion control, PWM (9) [11] - Initial rotor position Sensorless drive Saturation effect (10) [12] - Iterative feedback tuning Speed, position motor controller, PM servo drive (11) [13] - neural network; combining control (12) [14] - Electric Vehicle, Four-Wheel Drive, ABS, Control Strategy (13) [15] - Four-rotor mini rotorcraft, System design, Modular programming method, Brushless Motor Driver (14) [16]- Actuator, Fuel control, Limited-angle torque motor (LATM), PID control turbine engine, design, performance (15) [17] - Direct torque control (16) [20] - Solar-cell electrical vehicles, brushless dc machine, direct drive, modelling and simulation of electric vehicles, energy management algorithm (17) [23] - initial rotor position, saturation, voltage-pulse injection. (18) [25] - Brushless DC Motor, Switching functions, Modelling, Simulation, DSP. (19) [27] – sensorless commutation (20) [28] -, nonlinear control system, self bearing motor. (21) [29] - back-EMF, sensorless control, mixed-mode IC, FPGA. (22) [33] - Over-modulation, matrix converter (23) [35] - position sensorless control (24) [36] - Electric Power Steering, Brushless, Electronic Control Unit, modelling, test bench (25) [36] - electric power steering, research (26) [37] - human-simulated intelligent control; improved genetic algorithm; double-loop control system; brushless DC motor; multi-mode control	27
----------------	--	----

	(27) [39] - PWM, voltage source inverter, zero voltage switching, state-plane analysis	
--	--	--

Design	(1) [5] – drive (2) [15] - Four-rotor mini rotorcraft, System design, Modular programming method, Brushless Motor Driver (3) [16]- Actuator, Fuel control, Limited-angle torque motor (LATM), PID control turbine engine, design, performance (4) [19] - servo motor for ceiling fan (5) [22] - Torque Ripple; Motor Design (6) [23] - initial rotor position, saturation, voltage-pulse injection. (7) [28] - Bearingless motor, nonlinear control system, selfbearing motor. (8) [31] - design toroidally-wound BLDC, optimal	8
---------------	--	---

Model	(1) [6] - dynamic mathematical model, simulation (2) [20] - Solar-cell electrical vehicles, brushless dc machine, direct drive, modelling and simulation of electric vehicles, energy management algorithm (3) [25] - Brushless DC Motor, Switching functions, Modelling, Simulation, DSP. (4) [28] - Bearingless motor, nonlinear control system, selfbearing motor. (5) [31] - design toroidally-wound BLDC, optimal (6) [36] - Electric Power Steering, Brushless, Electronic Control Unit, modelling, test bench (7) [36] - electric power steering, research (8) [37] - human-simulated intelligent control; improved genetic algorithm; double-loop control system; brushless DC motor; multi-mode control	8
--------------	---	---

Simulation	(1) [6] - dynamic mathematical model, simulation (2) [17] - <i>Direct torque control</i> (3) [18] – <i>performance study, incomplete magnetization effect; BLDC, cogging torque, FEM, magnetization, permanent magnet.</i> (4) [21] - <i>Axial flux brushless DC machine, Stress, modal and thermal Analysis, flywheel, finite element</i> (5) [25] - <i>Brushless DC Motor, Switching functions, Modelling,</i>	11
-------------------	--	----

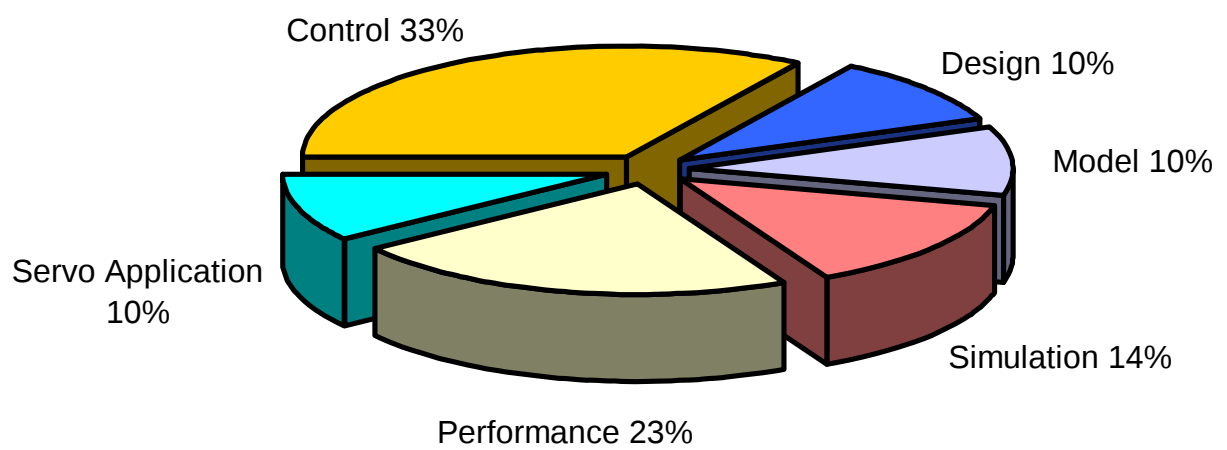
	<i>Simulation, DSP.</i> (6) [34] – Simulation, anomaly detector in winding insulation faults, Lab VIEW evaluation of experimental results, aircraft, Actuator (7) [35] - position sensorless control (8) [36] - Electric Power Steering, Brushless, Electronic Control Unit, modelling, test bench (9) [36] - electric power steering, research (10) [37] - human-simulated intelligent control; improved genetic algorithm; double-loop control system; brushless DC motor; multi-mode control (11) [38] - internal fault, winding function	
--	---	--

Performance	(1) [4] – performance evaluation, experiment (2) [9] - Automatic phase advance adjustment, single-phase BLDC motor. (3) [18] – performance study, incomplete magnetization effect; BLDC, cogging torque, FEM, magnetization, permanent magnet. (4) [20] - Solar-cell electrical vehicles, brushless dc machine, direct drive, modelling and simulation of electric vehicles, energy management algorithm (5) [21] - Axial flux brushless DC machine, Stress, modal and thermal Analysis, flywheel, finite element (6) [22] - Torque Ripple; Motor Design (7) [23] - initial rotor position, saturation, voltage-pulse injection. (8) [24] – performance, back-EMF, position-dependent, load torque (9) fault diagnostics, fault tolerant control, controller design. The neural network state observer (10) [30] - Motor cooling system, Motor thermal management, Optimization, Rotating flow (11) [31] - design toroidally-wound BLDC, optimal (12) [32] - magnetic field, optimization, permanent magnet, Hallbach (13) [31] - design toroidally-wound BLDC, optimal (14) [34] – Simulation, anomaly detector in winding insulation faults, Labview evaluation of experimental results, aircraft, Actuator (15) [36] - Electric Power Steering, Brushless, Electronic Control Unit, modelling, test bench	18
--------------------	---	----

	(16)	[36] - electric power steering, research	
	(17)	[38] - internal fault, winding function	
	(18)	[40] - soft magnetic composite (SMC), compressor	

Servo Applications	(1)	[2] - electric brake, energy regeneration, electric vehicle (EV)	8
	(2)	[3] – High speed BLDC, robots and medical applications	
	(3)	[12] - Iterative feedback tuning Speed, position motor controller, PM servo drive	
	(4)	[14] - Electric Vehicle, Four-Wheel Drive, ABS, Control Strategy	
	(5)	[16]- Actuator, Fuel control, Limited-angle torque motor (LATM), PID control turbine engine, design, performance	
	(6)	[19] - servo motor for ceiling fan	
	(7)	[34] – Simulation, anomaly detector in winding insulation faults, Lab VIEW evaluation of experimental results, aircraft, Actuator	
	(8)	[40] - soft magnetic composite (SMC), compressor	

Interpretation of results



References 2009

- [1] A Control Strategy for Four-Switch Three-Phase Brushless DC Motor Using Single Current Sensor Changliang Xia; Zhiqiang Li; Tingna Shi; Industrial Electronics, IEEE Transactions on Volume 56, Issue 6, June 2009 Page(s):2058 - 2066 Digital Object Identifier 10.1109/TIE.2009.2014307
- [2] A Cost-Effective Method of Electric Brake With Energy Regeneration for Electric Vehicles Ming-Ji Yang; Hong-Lin Jhou; Bin-Yen Ma; Kuo-Kai Shyu; Industrial Electronics, IEEE Transactions on Volume 56, Issue 6, June 2009 Page(s):2203 - 2212 Digital Object Identifier 10.1109/TIE.2009.2015356
- [3] A current ripple reduction of a high-speed miniature brushless direct current motor using instantaneous voltage control Lee, D.-H.; Ahn, J.-W.; Electric Power Applications, IET Volume 3, Issue 2, March 2009 Page(s):85 - 92 Digital Object Identifier 10.1049/iet-epa:20070490
- [4] A simple and accurate method for the experimental performance evaluation of high speed sensorless brushless dc motors Nagorny, A.S.; Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC '09. IEEE International 3-6 May 2009 Page(s):916 – 921 Digital Object Identifier 10.1109/IEMDC.2009.5075313
- [5] A soft-switching hybrid BLDC drive using dc-dc converter Madani, S.M.; Shahbazi, M.M.; Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC '09. IEEE International 3-6 May 2009 Page(s):1290 - 1294 Digital Object Identifier 10.1109/IEMDC.2009.5075369
- [6] Adaptive back-stepping control based on recurrent neural network for BLDCM EMA Lv Yong-jian; Wang Jin; Dong Hui; Zhang Peng; Yang Peng-song; Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPEMC '09. IEEE 6th International 17-20 May 2009 Page(s):1938 - 1943 Digital Object Identifier 10.1109/IPEMC.2009.5157714
- [7] Adaptive position tracking control of a BLDC motor using a recurrent wavelet neural network Chia-Yu Hsu; Chun-Fei Hsu; Chih-Min Lin; Tsu-Tian Lee; Networking, Sensing and Control, 2009. ICNSC '09. International Conference on 26-29 March 2009 Page(s):25 - 30 Digital Object Identifier 10.1109/ICNSC.2009.4919240
- [8] Adaptive fuzzy control of DC motors using state and output feedback Gerasimos G. Rigatos Unit of Industrial Automation, Industrial Systems Institute, Stadiou str., 26504 Rion Patras, Greece Electric Power Systems Research xxx (2009) xxx–xxx Contents lists available at [Science Direct](#)
- [9] An Accurate Automatic Phase Advance Adjustment of Brushless DC Motor Chun-Lung Chiu; Yie-Tone Chen; Yu-Hsiang Shen; Ruey-Hsun Liang; Magnetics, IEEE transactions on Volume 45, Issue 1, Part 1, Jan. 2009 Page(s):120 - 126 Digital Object Identifier 10.1109/TMAG.2008.2002690
- [10] An FPGA-Based Novel Digital PWM Control Scheme for BLDC Motor Drives Sathyan, A.; Milivojevic, N.; Lee, Y.-J.; Krishnamurthy, M.; Emadi, A.; Industrial Electronics, IEEE Transactions on Volume 56, Issue 8, Aug. 2009 Page(s): 3040 - 3049 Digital Object Identifier 10.1109/TIE.2009.2022067

- [11] A novel method for estimating the initial rotor position of PM motors without the position sensor Alireza Rostami *, Behzad Asaei School of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran Energy Conversion and Management 50 (2009) 1879–1883 Contents lists available at [ScienceDirect](#)
- [12] Brushless DC torque motors quality level indexes for servo drive applications Mikerov, Alexander G.; EUROCON 2009, EUROCON '09. IEEE 18-23 May 2009 Page(s):827 - 834 Digital Object Identifier 10.1109/EURCON.2009.5167730
- [13] CMAC Neural Networks Based Combining Control for BLDC Motor Zheng Li; Intelligent Systems and Applications, 2009. ISA 2009. International Workshop on 23-24 May 2009 Page(s):1 - 4 Digital Object Identifier 10.1109/IWISA.2009.5072781
- [14] Control strategy for ABS of EV with independently controlled four in-wheel motors Zhou Yong; Li Shengjin; Fang Zongde; Zhou Qixun; Industrial Electronics and Applications, 2009. ICIEA 2009. 4th IEEE Conference on 25-27 May 2009 Page(s): 2471 - 2476 Digital Object Identifier 10.1109/ICIEA.2009.5138647
- [15] Design and implementation of an embedded control system for small Unmanned Aerial Vehicles: Application to a four-rotor mini rotorcraft XiaoJie Liu; XiaoHui Zhao; Sanchez, A.; Lozano, R.; Industrial Electronics and Applications, 2009. ICIEA 2009. 4th IEEE Conference on 25-27 May 2009 Page(s):414 - 419 Digital Object Identifier 10.1109/ICIEA.2009.5138239
- [16] Design and control of a brushless DC limited-angle torque motor with its application to fuel control of small-scale gas turbine engines Ching-Chih Tsai, Shui-Chun Lin, Hsu-Chih Huang, Yu-Ming Cheng Department of Electrical Engineering, National Chung Hsing University 250, Kuo-Kuang Road, Taichung 40227, Taiwan
- [17] Direct torque control of Brushless DC motor without flux linkage observation Jianfei Yang; Yuwen Hu; Wenxin Huang; Jianbo Chu; Jin Gao; Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPEMC '09. IEEE 6th International 17-20 May 2009 Page(s):1934 - 1937 Digital Object Identifier 10.1109/IPEMC.2009.5157713
- [18] Effect of the Incomplete Magnetization of Permanent Magnet in the Characteristics of BLDC Motor Sung Hong Won; Won Ho Kim; Ju Lee; Magnetics, IEEE Transactions on Volume 45, Issue 6, June 2009 Page(s): 2847 - 2850 Digital Object Identifier 10.1109/TMAG.2009.2018691
- [19] Development of new structure of brushless DC servo motor for ceiling fan Chuan-Sheng Liu; Jong-Chin Hwang; Liang-Rui Chen; Chih-Cheng Fu; Industrial Electronics and Applications, 2009. ICIEA 2009. 4th IEEE Conference on 25-27 May 2009 Page(s): 2640 - 2643 Digital Object Identifier 10.1109/ICIEA.2009.5138686
- [20] Energy Management Method for solar race car design and application Ustun, O.; Yilmaz, M.; Gokce, C.; Karakaya, U.; Tuncay, R.N.; Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC '09. IEEE International 3-6 May 2009 Page(s):804 - 811 Digital Object Identifier 10.1109/IEMDC.2009.5075296
- [21] High speed electromechanical flywheel design for rural electrification in Sub Saharan Africa Okou, R.; Mwaba, G.; Khan, M.A.; Barendse, P.; Pillay, P.; Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC '09. IEEE International 3-6 May 2009

- [22] Improved Design for Reduction of Torque Ripple of Brushless DC Motor Aiyuan Wang; Zhihao Ling; Industrial and Information Systems, 2009. IIS '09. International Conference on 24-25 April 2009 Page(s):376 - 379 Digital Object Identifier 10.1109/IIS.2009.115 Summary: The paper has probed into the torque ripple of brushless
- [23] Initial Rotor Position Estimation for Sensorless Brushless DC Drives Champa, P.; Somsiri, P.; Wipasuramonton, P.; Nakmahachalasint, P.; Industry Applications, IEEE Transactions on Volume 45, Issue 4, July-aug. 2009 Page(s):1318 - 1324 Digital Object Identifier 10.1109/TIA.2009.2023355
- [24] Low-speed performance comparisons of back-EMF detection circuits with position-dependent load torque Chen, H.-C.; Tsai, T.-Y.; Huang, C.-K.; Electric Power Applications, IET Volume 3, Issue 2, March 2009 Page(s):160 - 169 Digital Object Identifier 10.1049/iet-epa:20080017
- [25] Modelling, simulation and implementation of four-switch, Brushless DC motor drive based on switching functions Niasar, A. Halvaei; Moghbelli, H.; Vahedi, A.; EUROCON 2009, EUROCON '09. IEEE 18-23 May 2009 Page(s):682 - 687 Digital Object Identifier 10.1109/EURCON.2009.5167707
- [26] Neural network based fault diagnosis and fault tolerant control for BLDC motor Zheng Li; Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPEMC '09. IEEE 6th International 17-20 May 2009 Page(s):1925 - 1929 Digital Object Identifier 10.1109/IPEMC.2009.5157711
- [27] New sensorless commutation technique for brushless DC motors Gambetta, D.; Ahfock, A.; Electric Power Applications, IET Volume 3, Issue 1, January 2009 Page(s):40 - 49 Digital Object Identifier 10.1049/iet-epa:20070517
- [28] Nonlinear Feedback Control of a Bearingless Brushless DC Motor Grabner, H.; Amrhein, W.; Silber, S.; Gruber, W.; Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on : Accepted for future publication Volume PP, Forthcoming, 2009 Page(s):1 - 8 Digital Object Identifier 10.1109/TMECH.2009.2014058
- [29] Novel Architecture of a Mixed-Mode Sensorless Control IC for BLDC Motors with Wide Speed Ranges Kuang-Yao Cheng; Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2009. APEC 2009. Twenty-Fourth Annual IEEE 15-19 Feb. 2009 Page(s):2022 - 2027 Digital Object Identifier 10.1109/APEC.2009.4802951
- [30] Numerical investigation and optimization of the thermal performance of a brushless DC motor Min-Soo Kim, Kwan-Soo Lee *, Sukkee Um School of Mechanical Engineering, Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Republic of Korea 2008 Elsevier Ltd. All rights reserved. International Journal of Heat and Mass Transfer 52 (2009) 1589–1599
- [31] Optimal design of toroidally-wound brushless DC machines Hak-In Lee; Noh, M.D.; Industrial Technology, 2009. ICIT 2009. IEEE International Conference on 10-13 Feb. 2009 Page(s):1 - 5 Digital Object Identifier 10.1109/ICIT.2009.4939666
- [32] Optimization Design of a Segmented Halbach Permanent-Magnet Motor Using an Analytical Model Markovic, M.; Perriard, Y.; Magnetics, IEEE Transactions on Volume

45, Issue 7, July 2009 Page(s): 2955 - 2960 Digital Object Identifier
10.1109/TMAG.2009.2015571

- [33] Over-modulation strategy of matrix converter driving Brushless DC motor systems Chunmei Hong; Bo Zhou; Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPEMC '09. IEEE 6th International 17-20 May 2009 Page(s):1906 - 1912 Digital Object Identifier 10.1109/IPEMC.2009.5157708
- [34] Particle filter based anomaly detection for aircraft actuator systems Brown, D.; Georgoulas, G.; Bae, H.; Vachtsevanos, G.; Chen, R.; Ho, Y.H.; Tannenbaum, G.; Schroeder, J.B.; Aerospace conference, 2009 IEEE 7-14 March 2009 Page(s):1 - 13 Digital Object Identifier 10.1109/AERO.2009.4839659
- [35] Position sensorless control for permanent-magnet brushless DC motor based on ASIC ML4425 Zhiwei Zhang; Libing Zhou; Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPEMC '09. IEEE 6th International 17-20 May 2009 Page(s):1903 - 1905 Digital Object Identifier 10.1109/IPEMC.2009.5157707
- [36] Research on Electric Power Steering with BLDC drive system Hui Zhang; Jinhong Liu; Jing Ren; Yuzhi Zhang; Yongjun Gao; Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPEMC '09. IEEE 6th International 17-20 May 2009 Page(s):1065 - 1069 Digital Object Identifier 10.1109/IPEMC.2009.5157543
- [37] Speed control of brushless DC motor using human-simulated intelligent control Zushu Li; Hao Yang; Industrial Mechatronics and Automation, 2009. ICIMA 2009. International Conference on 15-16 May 2009 Page(s):236 - 240 Digital Object Identifier 10.1109/ICIMA.2009.5156604
- [38] The Internal Fault Analysis of Brushless DC Motors Based on the Winding Function Theory Taehyung Kim; Hyung-Woo Lee; Sangshin Kwak; Magnetics, IEEE Transactions on Volume 45, Issue 5, Part 1, May 2009 Page(s):2090 - 2096 Digital Object Identifier 10.1109/TMAG.2009.2013246
- [39] Three-phase soft-switching PWM inverter for brushless DC motor He Hucheng; Du Jingyi; Cao Xiaosheng; Liu Weiguo; Industrial Electronics and Applications, 2009. ICIEA 2009. 4th IEEE Conference on 25-27 May 2009 Page(s): 3362 - 3365 Digital Object Identifier 10.1109/ICIEA.2009.5138826
- [40] The study on BLDC motor compressor using SMC Kang Geon Il; Han Man Seung; Yang Seung Hak; Lim Young Cheol; Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPEMC '09. IEEE 6th International 17-20 May 2009 Page(s):1930 - 1933 Digital Object Identifier 10.1109/IPEMC.2009.5157712