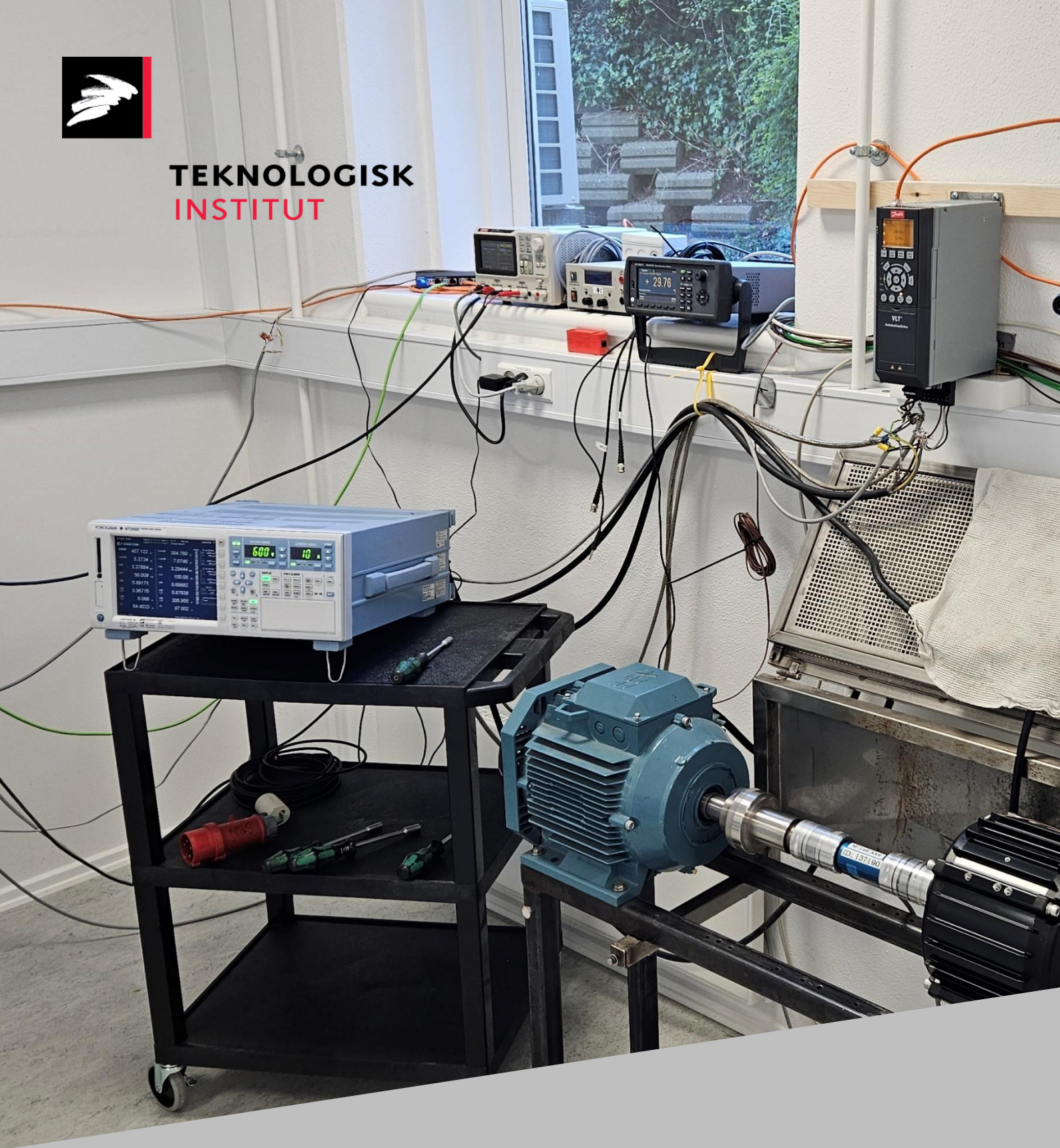




**TEKNOLOGISK  
INSTITUT**



Nye teknologier til højeffektive motorsystemer i fremstillingsindustrien

December 2024

## Indholdsfortegnelse

### Side

1	Sammenfatning	3
2	Summary	5
3	Baggrund	7
4	Elforbrug til motordrevne maskinsystemer	8
4.1	Nøgletal for teknologier	8
4.2	Nøgletal for brancher	10
4.3	Samlet teoretisk potentiale	12
4.3.1	Systemkomponenter	13
4.3.2	Teknologier	14
4.3.3	Brancher	15
5	Motor- og frekvensomformerteknologi	17
5.1	Asynkronmotorer	17
5.1.1	Motorens momentkurve	17
5.1.2	Asynkronmotorers virkningsgrad	19
5.2	PM-motorer (PermanentMagnet motorer)	19
5.2.1	PM-motorens momentkurve	20
5.2.2	PM-motorens effektivitet	20
5.3	Synkronreluktans motorer	21
5.3.1	Synkronreluktans motorens effektivitet	22
6	Klassificering af motorer	23
6.1	Frekvensomformerdrift	24
6.1.1	Konstant spændings-frekvensforhold	24
6.1.2	Kvadratisk spændings-frekvensforhold	25
6.1.3	Automatisk Energi Optimering (AEO)	26
7	Afprøvninger i Drives-lab	27
7.1	4-polet asynkronmotor	27
7.2	6-polet asynkronmotor	30
7.3	Permanentmagnet motor	33
8	WBG-frekvensomformere	36
8.1	WBG-teknologien	36
8.2	Anvendt WBG-teknologi i frekvensomformere	37
8.2.1	WBG-teknologi på indgangstrinnet	38
8.2.2	WBG-teknologi på udgangstrinnet	45

8.2.3	Målinger på en WBG-frekvensomformer	47
8.2.4	Konklusioner ift. virkningsgrader og perspektiver på WBG	50
9	Udvikling af applikationstilpasset software	52
10	Motor Systems Tool	56
10.1	Nye tabsmodeller	57
11	Demonstration af teknologier	58
11.1	Danfoss Drives	58
11.1.1	Ventilation i hal i Gråsten	58
11.1.2	Køleanlæg i en 365'butik i Nordborg	63
11.2	Hydraulico A/S	65
11.2.1	Hydraulisk presse hos Klokkeholm	65
12	Formidling	68
12.1	National formidling	68
12.2	International formidling	68

## 1 Sammenfatning

Nærværende projekt har haft til formål at identificere motorapplikationer med sparepotentiale, hvor nye teknologier har en særlig positiv indflydelse, samt sammensætte optimale motorsystempakker, der testes og suppleres med cases, så teknologierne hurtigt kan få udbredelse på markedet.

I projektet er der taget udgangspunkt i asynkronmotorer og PM-motorer samt traditionelle frekvensomformere og frekvensomformere baseret på WBG-teknologien (Wide Band Gap).

Desuden har det været projektets formål at undersøge mulighederne for at reducere energiforbruget i det komplette energisystem, dvs. elforsyning og elmotor inklusiv frekvensomformer, ved at anvende frekvensomformere med WPG teknologi og motorsystemer med frekvensomformere i det hele taget.

Der er foretaget tests (målinger) af elmotorer, - både asynkron- og PM-motorer, i Teknologisk Institut's motorlaboratorie, hvor motorerne er målt med og uden frekvensomformer. Desuden er der foretaget tests hos Danfoss Drives med elmotorer, der blev forsynet fra en frekvensomformer med WPG-teknologi. Endelig er mulighederne for anvendelse af frekvensomformere undersøgt på en række anlæg indenfor ventilation, hydraulik og køling. Undersøgelserne er udført i samarbejde med Danfoss og de deltagende fremstillingsvirksomheder.

De tests der er foretaget af både systemer med traditionelle frekvensomformere og af systemer med frekvensomformere med WPG har vist, at effektoptaget til det komplette motorsystem kan reduceres med op til ca. 2% som følge af lavere tab i frekvensomformerens samt lavere motortab.

Desuden er materialeforbruget en frekvensomformer med WPG i udgangspunktet mindre end ved produktion af en traditionel frekvensomformer. Det vil dog være formålstjenligt at montere filtre på både indgangs- og afgangssiden af frekvensomformerens, således at strømmen på både tilgangs- og afgangssiden er fuldstændig sinusformet. Det betyder nemlig, at tab der ellers vil være i elforsyningen samt på frekvensomformerens afgangsside vil forsvinde. Og mere vigtigt gør den sinusformede strøm på frekvensomformerens afgangsside det muligt at bruge frekvensomformere på ældre, eksisterende elmotorer, da det ikke er nødvendigt at motorerne har dobbelt isolerede viklinger og isolerede lejer. Dette åbner helt nye muligheder for at udbrede drift med frekvensomformere til motorsystemer, hvor det hidtil ikke har været teknisk eller økonomisk muligt. I den forbindelse skal det bemærkes, at frekvensomformere med WPG-teknologi endnu ikke er kommercielt tilgængelige, men er under udvikling. Derfor er de tests der er foretaget med WPG teknologien udført i et laboratorium hos Danfoss Drives.

De resultater der er opnået i projektet vil blive integreret i Motor System Tool som led i den løbende opdatering af værktøjet, hvilket vil ske i foråret 2025 som en del af den årlige opdatering.

Projektets resultater vil blive præsenteret på et webinar i foråret 2025 for danske interessenter, ligesom der er indsendt en artikel, der vil blive bragt i HVAC magasinet. Desuden vil der blive udarbejdet en artikel for internationale interessenter. Artiklen vil blive lagt op på hjemmesiden for 4E EMSA (Electric Motor Systems Annex), hvor MST-værktøjet til systemoptimering samt flere andre værktøjer der er udviklet af Teknologisk Institut ([www.iea-4e.org/emsa](http://www.iea-4e.org/emsa)) ligeledes findes. Endelig vil projektets resultater blive offentliggjort på en internationale konference, som f.eks. EEMODS, - både for at udbrede kendskabet til frekvensregulering og WPG-teknologien.

Projektet er finansieret af ELFORSK programmet med projektnr. 353-033, og er udført af følgende projektdeltagere.

Sandie B. Nielsen	+45 72201257	Teknologisk Institut
Søren Draborg	+45 72202028	Teknologisk Institut
Claus M. Hvenegaard	+45 72202525	Teknologisk Institut
Norbert Hanigovszki	+45 29284617	Danfoss Drives
Brian Svenningsen	+45 29292615	Hydraulico
Vladyslav Mishukov	+45 27201972	Multi-Wing International A/S

## 2 Summary

The purpose of the project has been to identify motor applications with savings potential, where new technologies have a particularly positive impact, and to design optimal motor system packages that are tested and supplemented with cases so that the technologies can quickly gain market penetration.

The project is based on asynchronous motors and PM motors as well as traditional frequency converters and frequency converters based on WBG technology (Wide Band Gap).

Furthermore, the purpose of the project has been to investigate the possibilities of reducing energy consumption in the complete energy system, i.e. electricity supply and electric motor including frequency converter, by using frequency converters with WPG technology and motor systems with frequency converters in general.

Tests (measurements) have been carried out on electric motors, both asynchronous and PM motors, in the Danish Technological Institute's motor laboratory, where the motors have been measured with and without a frequency converter. In addition, tests have been carried out at Danfoss Drives with electric motors that were supplied from a frequency converter with WPG technology. Finally, the possibilities for using frequency converters have been investigated in a number of systems within ventilation, hydraulics and cooling. The investigations have been carried out in collaboration with Danfoss and the participating manufacturing companies.

The tests carried out on both systems with traditional frequency converters and systems with frequency converters with WPG have shown that the power consumption of the complete motor system can be reduced by up to approx. 2% as a result of lower losses in the frequency converter and lower motor losses.

Furthermore, the material consumption of a frequency converter with WPG is initially lower than in the production of a traditional frequency converter. However, it would be advisable to install filters on both the input and output sides of the frequency converter, so that the current on both the input and output sides is completely sinusoidal. This means that losses that would otherwise be in the electricity supply and on the output side of the frequency converter will disappear. And more importantly, the sinusoidal current on the output side of the frequency converter makes it possible to use frequency converters on older, existing electric motors, as it is not necessary for the motors to have double insulated windings and insulated bearings. This opens up completely new possibilities for extending operation with frequency converters to motor systems where this has not been technically or economically possible until now. In this connection, it should be noted that frequency converters with WPG technology are not yet commercially available, but are under development. Therefore, the tests carried out with the WPG technology have been carried out in a laboratory at Danfoss Drives.

The results obtained in the project will be integrated into the Motor System Tool as part of the ongoing update of the tool, which will take place in spring 2025 as part of the annual update.

The project results will be presented at a webinar in the spring of 2025 for Danish stakeholders, and an article has been submitted to be published in HVAC magazine. In addition, an article will be prepared for international stakeholders. The article will be posted on the website of 4E EMSA (Electric Motor Systems Annex), where the MST tool for system optimization and several other tools developed by the Danish Technological Institute ([www.iea-4e.org/emsa](http://www.iea-4e.org/emsa)) are also available.

Finally, the project results will be published at an international conference, such as EEMODS, - both to spread the knowledge of frequency regulation and WPG technology.

The project is funded by the ELFORSK program with project no. 353-033, and is carried out by the following project participants.

Sandie B. Nielsen	+45 72201257	Teknologisk Institut
Søren Draborg	+45 72202028	Teknologisk Institut
Claus M. Hvenegaard	+45 72202525	Teknologisk Institut
Norbert Hanigovszki	+45 29284617	Danfoss Drives
Brian Svenningsen	+45 29292615	Hydraulicco
Vladyslav Mishukov	+45 27201972	Multi-Wing International A/S

### **3 Baggrund**

Der findes betragtelige energibesparelspotentialer ved at drifte elmotordrevne maskinsystemer effektivt. Det gøres blandt ved at sikre at motorsystemernes drift til stadighed tilpasses bedst muligt til behovet. Der er stadig mange motorsystemer der ikke er i stand til at regulere kapaciteten på anden vis end ved at tab (tryk, flow), fordi motorsystemet driftes ved konstant hastighed.

I mange tilfælde er motorsystemer af forskellige årsager pt. ikke i stand møde behovet for ydelse energieffektivt. En af de væsentligste årsager er, at de elmotorer der anvendes er af ældre typer uden dobbelt isolerede viklinger og isolerede lejer. Frekvensomformere med WPG teknologi vil kunne levere fuldstændig sinusformet strøm på både indgangs- og afgangssiden af frekvensomformeren. Det betyder, at behovet for dobbeltisolerede viklinger og isolerede lejer forsvinder, så ud over mindre tab i elforsyningen vil det være muligt at bruge frekvensomformere på ældre, eksisterende elmotorer.



## 4 Elforbrug til motordrevne maskinsystemer

Kapitlet giver i tabelform en oversigt over seks forskellige teknologiers elforbrug fordelt på syv brancher og tre motorstørrelser. Endvidere viser en række figurer, hvor stor en del af forbruget til en teknologi, der omsættes til nyttiggjort arbejde og tab i de forskellige systemkomponenter.

Der er anvendt følgende baggrundsmateriale:

- Årlige elforbrug for 2022 er opgjort af Danmarks statistik i 39 branchekategorier.
- Branchespecifikke elforbrugsfordelinger udtaget fra rapporten "Kortlægning af erhvervslivets energiforbrug" udarbejdet af Viegand & Maagøe ApS, Teknologisk Institut, DTU og Byggeri & Teknik I/S i 2022.
- I brancherne Nærings- og nydelsesmiddel samt Jern og metal er tidligere udført detaljerede motorkortlægninger for teknologianvendelse samt fordeling på effektintervaller. Disse er benyttet som grundlag for en branchevis vurdering af energiandel i tre anvendte effektintervaller – lille (0-4 kW), mellem (4-30 kW) og stor (30-500 kW).

Med ovennævnte kilder er der foretaget en kortlægning af, hvorledes elforbruget er fordelt på teknologier og effektstørrelser i de enkelte brancher.

Herefter er udformet et bedste skøn på, hvorledes dette forbrug fordeler sig i nødvendige systemkomponenter inden det effektueres i form af et egentligt arbejde.

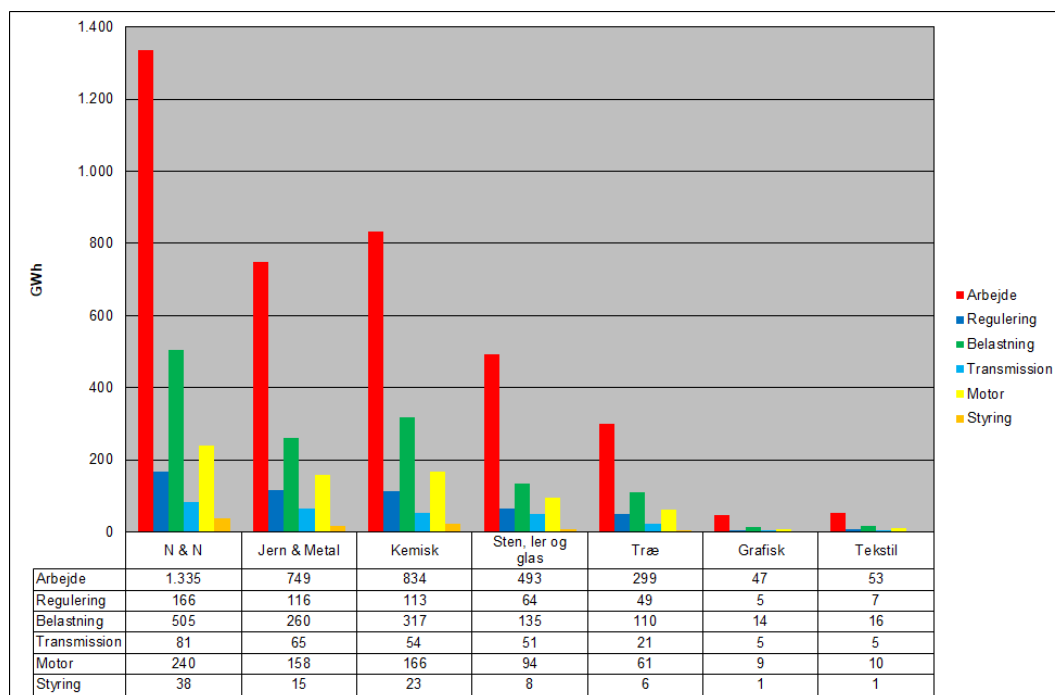
Situationen er vist som den er i dag og som den burde være med kendskabet til den optimale sammensætning af systemkomponenter og muligheder for anvendelse af elektrisk styring/regulering med dagens teknologi.

### 4.1 Nøgletal for teknologier

I dette kapitel vises dels det totale elforbrug for alle teknologier og dels forbruget for de enkelte teknologier fordelt på brancher og anlægsstørrelser udtrykt i påstemplet mærkepladeeffekt på elmotoren. Ydermere er i et diagram vist en estimeret tabsfordeling i maskinsystemet mellem:

- Elektrisk styring
- Elmotoren
- Transmissionen (remtrækket eller gearet)
- Belastningen (ventilatoren, pumpen, kompressoren m.v.)
- Mekanisk regulering (spjæld, drøvleventiler m.v.)

I samme diagram er vist et beregnet reelt arbejde, således at tabselementerne kan sættes i relation.



Figur 4.1.1 Årligt elforbrug for forskellige teknologier i dansk industri.

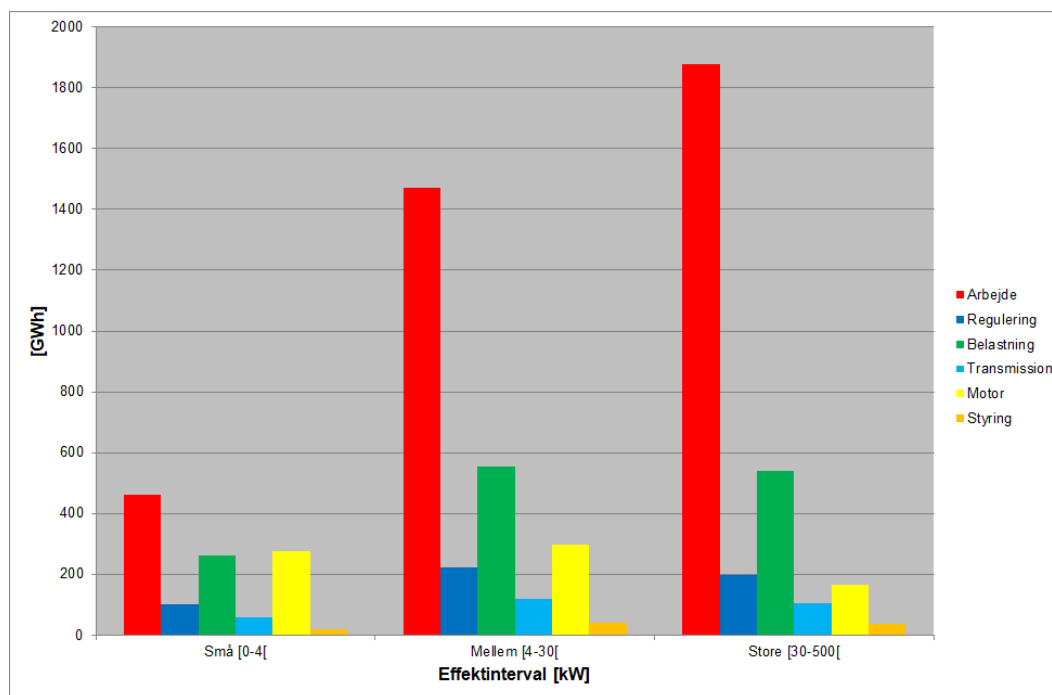
Størrelse [kW]	Små [0-4]	Mellem [4-30]	Store [30-500]	Total
Årligt forbrug	Energiforbrug [GWh]			
N&N	355	804	1207	2.367
Jern & Metal	210	819	335	1.364
Kemisk	301	527	678	1.506
Sten, ler og glas	169	296	381	846
Træ	109	191	246	547
Grafisk	16	28	36	81
Tekstil	18	32	41	92
I alt	1.180	2.698	2.924	6.803

Tabel 4.1.1 Fordeling af årlige energiforbrug på motorstørrelser i forskellige brancher.

I tabel 4.1.1 er vist, hvorledes det totale elforbrug vurderes fordelt mellem små, mellem og store motorsystemer i de forskellige brancher.

Det totale forbrug til elmotorer i de syv største brancher er opgjort til ca. 6.803 GWh, hvilket svarer til ca. 78% af industriens totale elforbrug.

I tabellen ses endvidere at de to store grupper bestående af elmotorer i størrelsen 4-500 kW er vurderet til at være de energimæssigt mest dominerende. Set ud fra en stykmæssig betragtning er der ingen tvivl om at gruppen bestående af småmotorer i intervallet 0-4 kW er den mest dominerende.



Figur 4.1.2 Nyttigt arbejde samt tab i forskellige systemkomponenter.

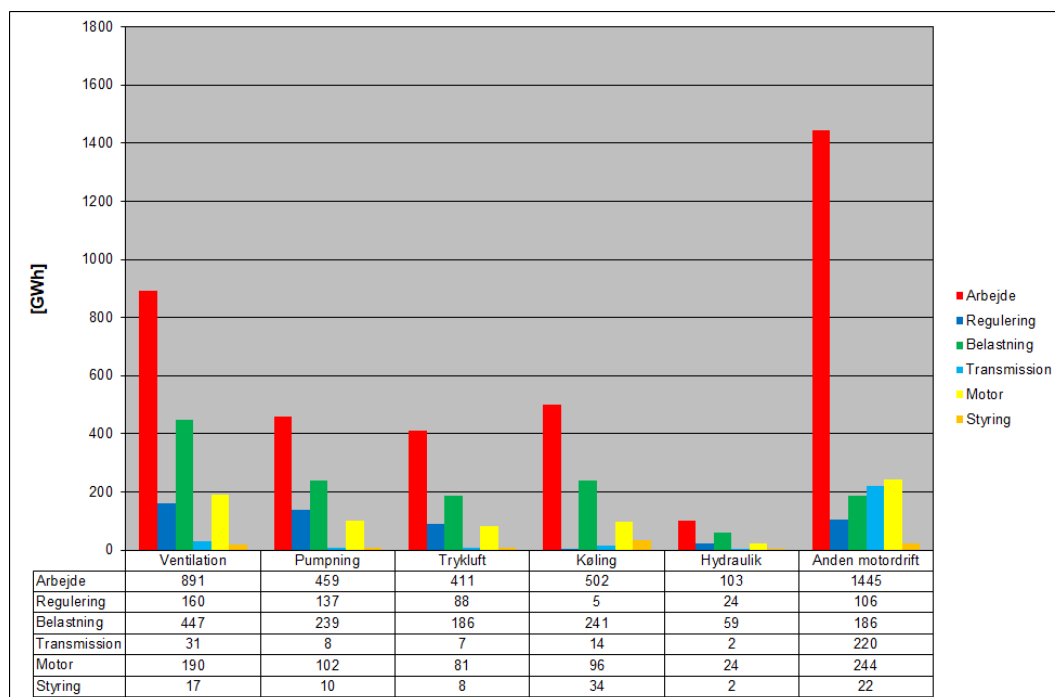
Den røde søjle "arbejde" i figur 4.1.2 er udnyttet arbejde - de øvrige søjler viser tab i den øvrige del af systemet.

I figuren ses at søjlen "arbejde" bliver mere dominerende jo højere op i effektinterval man bevæger sig. Med andre ord er den reelt udnyttede elandel stigende for stigende systemstørrelser. Dette bevirker at småmotorerne også set ud fra et potentialesynspunkt er en interessant gruppe i og med der reelt forefindes nogle relativt store besparelsesmuligheder på de enkelte systemer.

Specielt motor og belastning i systemet har betydelige tab for de mindre anlæg. Reelt skyldes dette den store brug af asynkronmotoren, der har kraftigt faldende virkningsgrad i de mindre størrelser. Det samme gælder for virkningsgrader for ventilatoren, pumpen, kompressoren osv..

## 4.2 Nøgletal for brancher

I det følgende vises i en række figurer, hvorledes det årlige elforbrug i de syv industrielle hovedbrancher fordeler sig på seks teknologier opdelt på nyttiggjort arbejde og tab. Endvidere viser andre figurer de forskellige teknologiers forbrug til nyttiggjort arbejde og tab inden for hver af de tre motorstørrelser.



Figur 4.2.1 Årligt forbrug for forskellige teknologier i dansk industri.

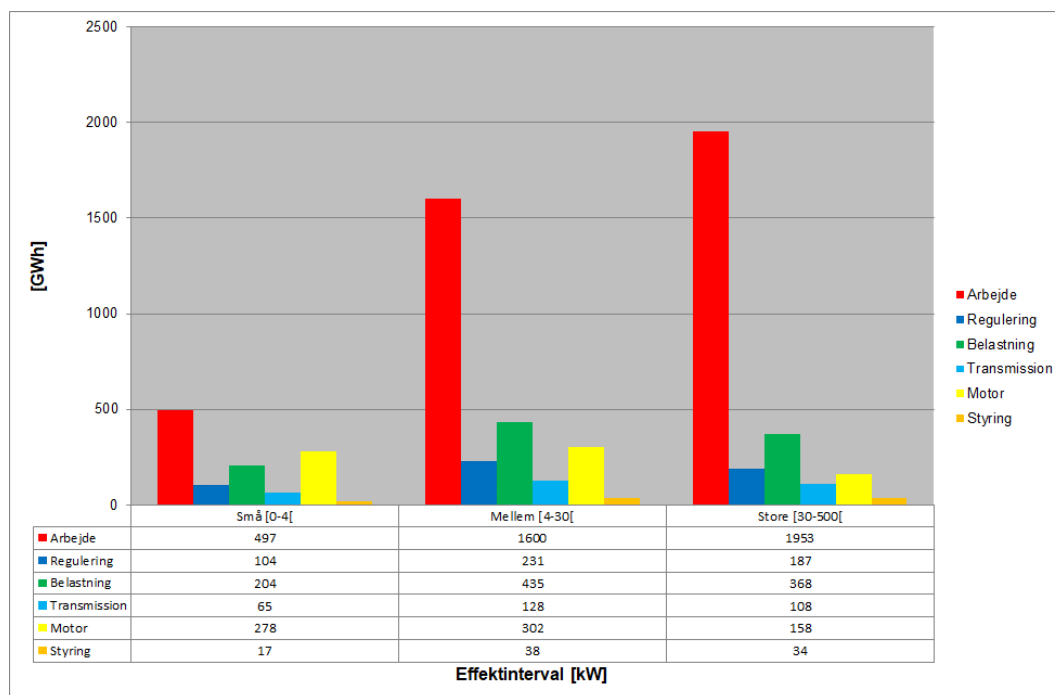
I figur 4.2.1 er forskellige teknologiers nyttiggjorte arbejde og tab vist for alle brancherne samlet.

Specielt teknologierne ventilation og pumpning har betydelige forbrug, der ikke udmøntes i et reelt arbejde. For disse to teknologier, der udgør en pæn andel af industriens elforbrug, ligger den totale gennemsnitsvirkningsgrad kun på 50%.

I tabel 4.2.1 er fordelingen mellem små, mellem og store motorsystemer opgjort på teknologier.

Størrelse [kW]	Små [0-4]	Mellem [4-30]	Store [30-500]	Total
Årligt forbrug	Energiforbrug [GWh]			
Ventilation	295	701	739	1.736
Pumpning	166	335	456	956
Trykluft	138	313	330	781
Køling	150	399	344	892
Hydraulik	43	75	96	214
Anden motordrift	389	876	959	2.224
I alt	1.181	2.699	2.924	6.803

Tabel 4.2.1 Fordeling af årlige energiforbrug på forskellige teknologier.



Figur 4.2.2 Nyttiggjort arbejde samt tab i forskellige systemkomponenter.

Figur 4.2.2 viser som forventet, at fordelingen mellem nyttiggjort arbejde og tab fordelt på motorstørrelser opgjort inden for samtlige brancher er den samme som fordelingen opgjort for teknologierne samlet.

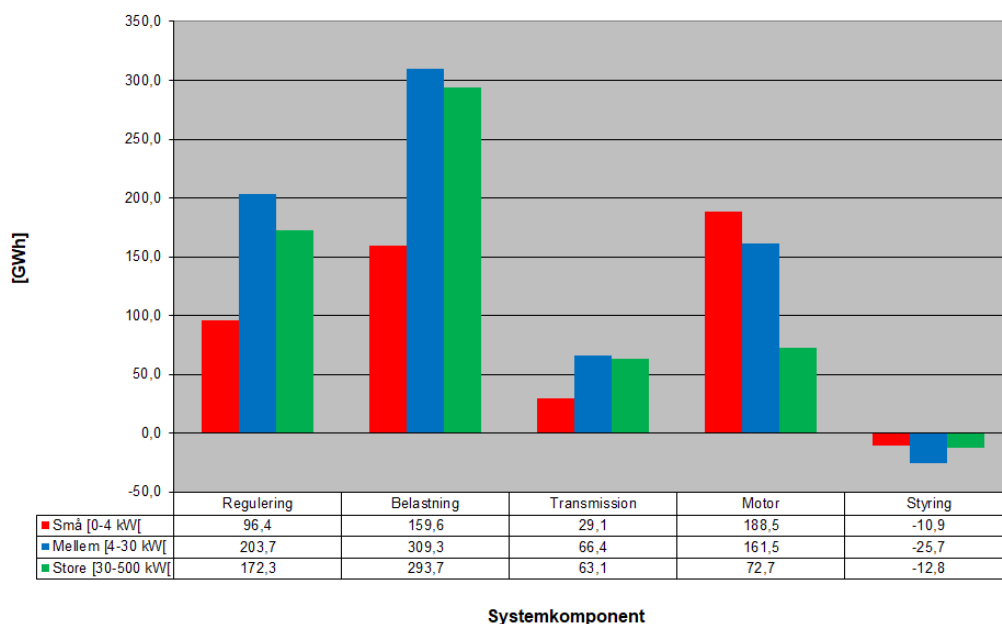
### 4.3 Samlet teoretisk potentiale

I de følgende tre diagrammer er der estimeret et teoretisk besparelspotentiale. Estimerterne er udformet ud fra følgende tre antagelser:

- elektrisk regulering anvendes fremfor mekanisk
- belastningsgraden er optimal for såvel enkeltkomponenten som systemet
- bedste teknologi på markedet anvendes for såvel enkeltkomponenten som systemet
- tilbagebetalingstiden er mindre end 10 år

Det samlede potentiale er opgjort til 1.767 GWh, svarende til ca. 26% af det nuværende elforbrug til motordrevne maskinsystemer i industrien, eller ca. 20% af industriens nuværende elforbrug.

### 4.3.1 Systemkomponenter



Figur 4.3.1.1 Besparelspotentialer for systemkomponenter.

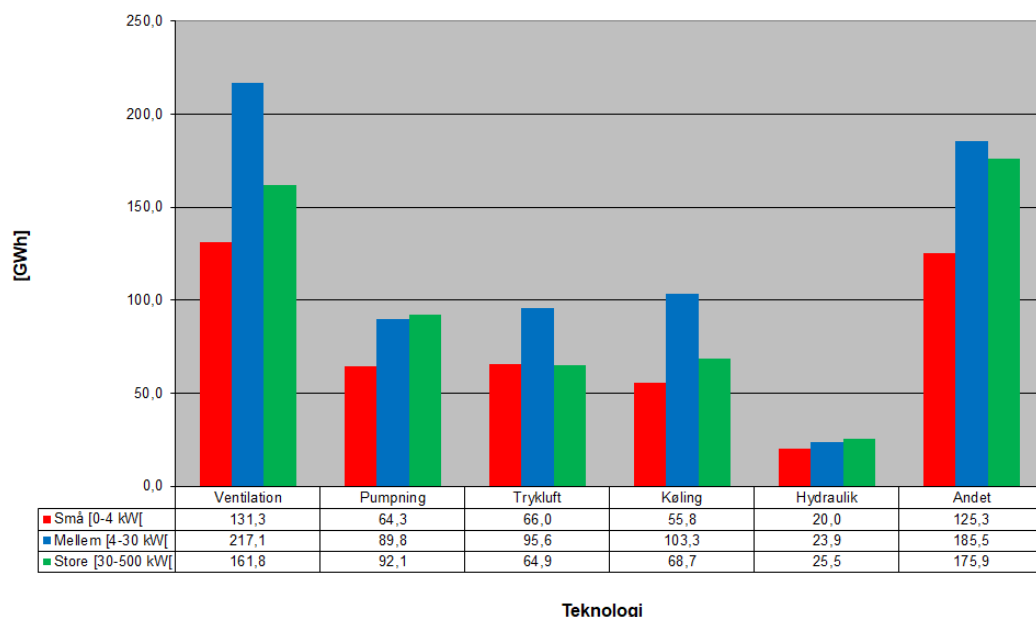
Som det ses, udgøres det største potentiale af at erstatte belastninger (ventilatorer, pumper, trykluftkompressor m.m.) med mere effektive typer. Der kan spares ca. 763 GWh ved at udskifte til mere energieffektive belastninger.

Det næststørste enkeltpotentiale kan realiseres ved at erstatte mekanisk regulering med elektrisk regulering i form af frekvensomformere m.v.. Elforbruget kan reduceres med ca. 472 GWh ved at anvende frekvensregulering i stedet for drøvleventiler, spjældreguleringer m.v.. Frekvensomformernes energiforbrug er dog ca. 49 GWh, så det totale besparelspotentiale er ca. 423 GWh.

Endelig er det muligt at reducere energiforbruget til motorsystemer ved at anvende de mest energieffektive teknologier, som f.eks. IE4 asynkronmotorer, PM-motorer og synkronreluktansmotorer.

Den samlede besparelse på ca. 159 GWh indenfor transmissionen skyldes primært to faktorer. Den store anvendelse af elektrisk styring og nye motortyper bevirker at en traditionel transmission i form af et gear eller remtræk helt kan udelades. Ydermere forventes de ineffektive men billige snekkegear på sigt at blive erstattet med eksempelvis tandhjulsgear, der har en højere effektivitet i hele arbejdsområdet.

### 4.3.2 Teknologier



Figur 4.3.2.1 Besparelspotentialer på teknologier fordelt på små, mellem og store anlæg.

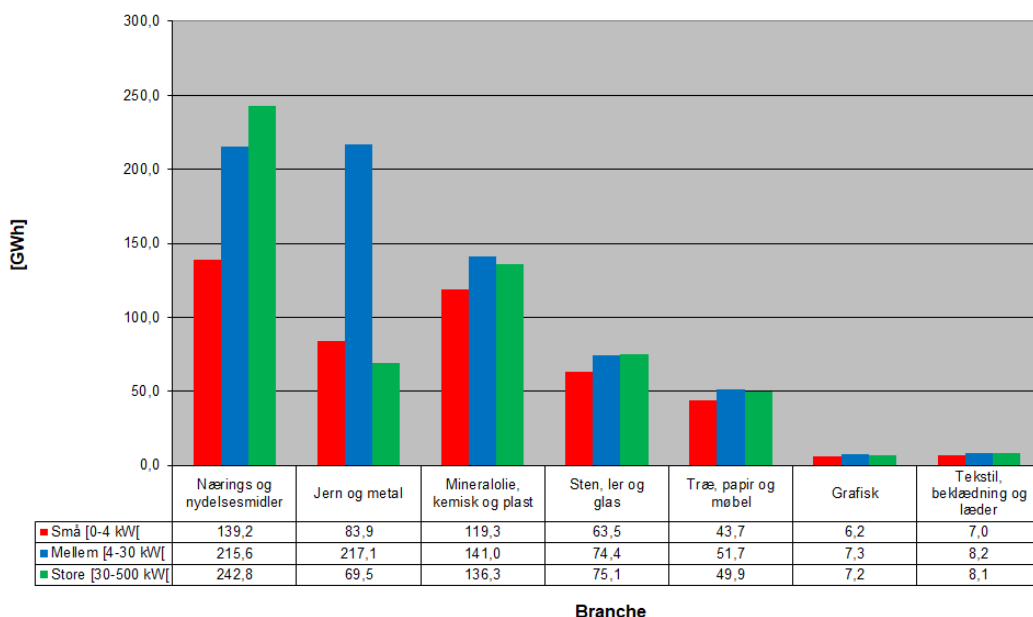
Fordeles de 1.767 GWh på teknologier slår den generelt store udbredelse af ventilation og anden motordrift kraftigt igennem. Alene inden for disse to teknologier findes ca. 997 GWh eller 56% af det samlede potentiale. 14% af potentialet findes indenfor pumpeområdet, mens de øvrige teknologier – køling, trykluft og hydraulik – hver især udgør henholdsvis 13%, 13% og 4% af potentialet.

Indenfor anden motordrift består potentialet i høj grad af øgede belastningsgrader samt øget anvendelse af energieffektive transmissioner.

Indenfor teknologien ventilation består potentialet i anvendelse af frekvensomformere fremfor spjæld samt bedre valg af motorstørrelser.

Ca. 40% af potentialet kan realiseres i systemer med elmotorer i effektintervallet 4-30 kW. Det øvrige potentiale fordeler sig nogenlunde ligeligt mellem systemer henholdsvis større eller mindre end den dominerende gruppe.

### 4.3.3 Brancher



Figur 4.3.3.1 Besparelspotentialer på brancher fordelt på små, mellem og store anlæg.

De tre brancher nærings- og nydelsesmidler, jern- og metal samt kemi er selvfølgelig meget dominerende i kraft af deres størrelse. 77% af sparepotentialet findes indenfor disse tre brancher.

### Detaljeret oversigt over besparelspotentiale

Besparelse	Små [0-4 kW]	Mellem [4-30 kW]	Store [30-500 kW]	I alt	Små [0-4 kW]	Mellem [4-30 kW]	Store [30-500 kW]	I alt
Regulering	96,4	203,7	172,3	472,3	94,0	91,7	87,6	90,6
Belastning	159,6	309,3	293,7	762,6	60,7	55,9	54,3	56,2
Transmission	29,1	66,4	63,1	158,6	50,1	56,3	59,7	56,3
Motor	188,5	161,5	72,7	422,6	68,4	54,4	43,7	57,2
Styring	-10,9	-25,7	-12,8	-49,3	-61,1	-65,9	-35,3	-53,1
<b>I alt</b>	<b>462,7</b>	<b>715,2</b>	<b>589,0</b>	<b>1767,0</b>	<b>64,5</b>	<b>58,2</b>	<b>56,3</b>	<b>59,1</b>
Besparelse	Små [0-4 kW]	Mellem [4-30 kW]	Store [30-500 kW]	I alt	Små [0-4 kW]	Mellem [4-30 kW]	Store [30-500 kW]	I alt
Ventilation	131,3	217,1	161,8	510,2	44,4	31,0	21,9	29,4
Pumpning	64,3	89,8	92,1	246,2	38,9	26,8	20,2	25,8
Trykluft	66,0	95,6	64,9	226,5	47,9	30,5	19,7	29,0
Køling	55,8	103,3	68,7	227,9	37,3	25,9	20,0	25,5
Hydraulik	20,0	23,9	25,5	69,5	46,9	32,0	26,5	32,5
Andet	125,3	185,5	175,9	486,7	32,2	21,2	18,3	21,9
<b>I alt</b>	<b>462,7</b>	<b>715,2</b>	<b>589,0</b>	<b>1767,0</b>	<b>39,2</b>	<b>26,5</b>	<b>20,1</b>	<b>26,0</b>
Besparelse	Små [0-4 kW]	Mellem [4-30 kW]	Store [30-500 kW]	I alt	Små [0-4 kW]	Mellem [4-30 kW]	Store [30-500 kW]	I alt
Nærings- og nydelsesmidler	139,2	215,6	242,8	597,6	39,2	26,8	20,1	25,3
Jern og metal	83,9	217,1	69,5	370,5	39,9	26,5	20,8	27,2
Mineralolie, kemisk og plast	119,3	141,0	136,3	396,5	39,6	26,7	20,1	26,3
Sten, ler og glas	63,5	74,4	75,1	213,0	37,6	25,1	19,7	25,2
Træ, papir og møbel	43,7	51,7	49,9	145,4	39,9	27,0	20,3	26,6
Grafisk	6,2	7,3	7,2	20,7	38,2	25,7	19,7	25,5
Tekstil, beklædning og læder	7,0	8,2	8,1	23,4	38,1	25,5	19,6	25,4
<b>I alt</b>	<b>462,7</b>	<b>715,2</b>	<b>589,0</b>	<b>1767,0</b>	<b>39,2</b>	<b>26,5</b>	<b>20,1</b>	<b>26,0</b>

Figur 4.3.3.2 Detaljeret oversigt over besparelspotentiale.



I de syv største brancher i fremstillingsindustrien går ca. 70% af elforbruget til elektriske motorsystemer, og besparelspotentialet er opgjort til knap 20%<sup>1</sup>, svarende til dvs. til 14.220 GWh. Fra den 1. juli 2021 har der været skærpede Ecodesign krav til elmotorer mellem 0,12 kW og 1.000 kW.

Næste generation af teknologi til motorsystemer, der er baseret på PM-teknologi eller synkronreluktans, er på vej. Sidstnævnte bruger modsat permanent magnet-motorerne (PM) ikke sjældne jordarter, som der generelt er rift om.

For frekvensomformerne og på effektelektroniksidens er det særligt WBG-teknologien, der fokuseres på. WBG-teknologien kan give op til 70% besparelse af tabet i frekvensomformere. Derudover ligger der meget store besparelser i at sammensætte motorsystemerne, så de passer til applikationerne, dvs. den driftstid, de laster og de transmissionstab, som motorsystemerne er udsat for.

Det har været projektets formål at identificere forskelligartede applikationer med sparepotentiale, hvor de nye teknologier har en særlig positiv indflydelse, og sammensætte optimale motorsystempakker der testes, således at teknologierne hurtigt kan få udbredelse på markedet.

---

<sup>1</sup> Dansk Energi - tabelopslag om elforbrug og besparelser i maskinsystemer – opgjort for udvalgte teknologier og brancher 2015.

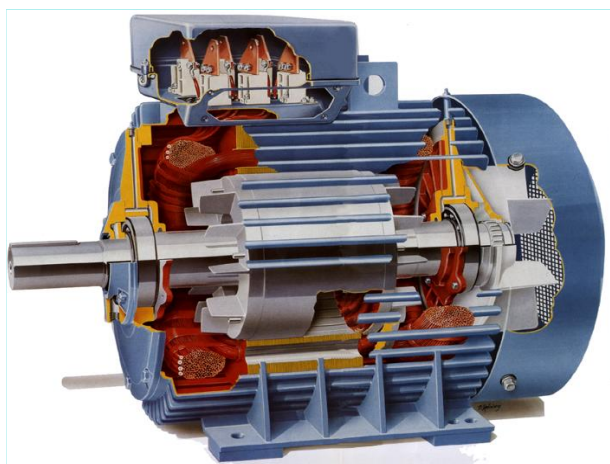
## 5 Motor- og frekvensomformerteknologi

### 5.1 Asynkronmotorer

Asynkronmotoren, som også benævnes induktionsmotoren, er den mest benyttede motor. Den består af to hovedbestanddele. En stillestående del, benævnt statoren, og en roterende del, benævnt rotoren.

Princippet er, at statoren genererer et roterende magnetfelt (drejefelt), når motoren påtrykkes en spænding fra nettet. Drejefeltets rotationshastighed er bestemt af statorspændingens frekvens. Dette felt inducerer en spænding i rotorstavene, og der vil løbe en strøm i rotoren, da denne er kortsluttet. Gennem vekselvirkning mellem magnetfelt i statoren og strømmen i rotoren opstår en kraft, der får rotoren og dermed motorakslen til at rotere. Rotoren roterer lidt langsommere end statorfeltet (omløbstallene er asynkrone, heraf navnet asynkronmotor).

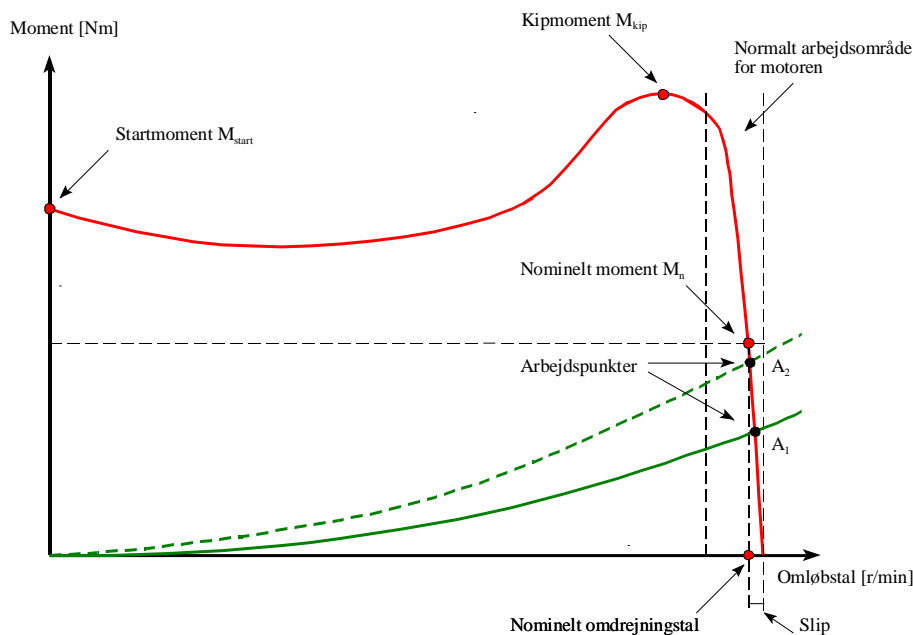
Asynkronmotoren har den fordel, at den er relativ billig og driftssikker samt har begrænset behov for vedligeholdelse.



Figur 5.1.1 Snittegning af asynkronmotor.

#### 5.1.1 Motorens momentkurve

En trefaset asynkronmotor har en momentkurve som illustreret med figur 4.2. Kurven er typisk karakteriseret ved 3 punkter – nemlig startmomentet, kipmomentet og det nominelle moment. Disse tre værdier er som regel angivet i motorkataloget, men kan i alle tilfælde oplyses af fabrikanten. Forholdet mellem de forskellige momenter kan variere fra motor til motor men udformningen af kurven er i grove træk som vist.



Figur 5.1.1.1 Momentkurve for asynkronmotor.

Ved almindelig net-tilsluttet drift vil motoren arbejde inden for de to lodrette stiplede linjer afhængig af belastningen. På figuren er momentkarakteristikken vist for en ventilator (fuld optrukken grøn kurve). Motorens momentkurve og momentkarakteristikken for belastningen skærer hinanden i arbejdspunktet  $A_1$ . Skæringspunktet kaldes også den stationære tilstand.

Ved øget belastningsmoment vil momentkarakteristikken for belastningen flytte sig (stiplet grøn kurve) og arbejdspunktet rykke sig fra  $A_1$  til  $A_2$ . Hermed falder hastigheden på motoren en anelse. Falder belastningen derimod igen vil motorens hastighed tilsvarende stige.

En momentstigning medfører at slippet i motoren stiger og derved falder den aktuelle hastighed for motoren. Slippet er forskellen mellem det roterende magnetfelt i statoren som altid har samme frekvens som det forsyningsnet motoren sidder på – typisk 50 Hz og rotorens aktuelle hastighed. Ved tomgang er slippet typisk ca. 2-3% for en standard asynkronmotor og efterhånden som belastningen stiger øges slippet tilsvarende.

Hvis belastningen bliver alt for høj og overstiger kipmomentet "taber" motoren belastningen og belastningskomponenten går i stå. I dette tilfælde må det konstateres at motoren er kraftigt underdimensioneret.

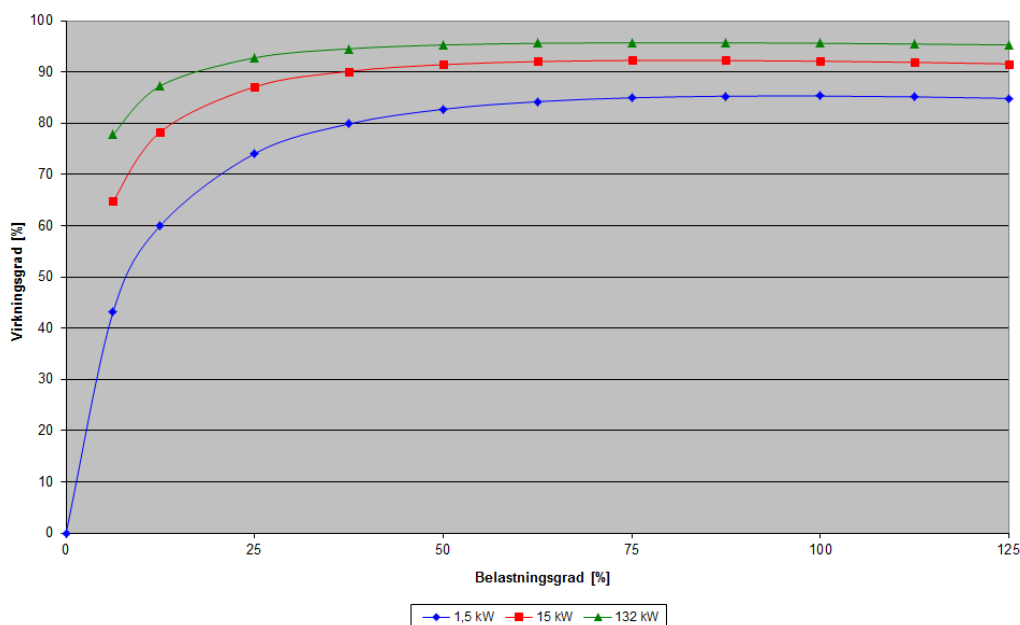
Trefasede asynkronmotorer er typisk udformet således, at de kan tåle en kontinuert belastning på maksimalt det nominelle moment. Overstiger man dette moment vil der være forøget varmeudvikling i motoren, og dermed krav om særlig ventilation af motoren.

I normen IEC 34-1 er der defineret en række driftsformer for elektromotorer, hvor der tages højde for varmeudviklingen i motoren med deraf følgende reduktion af motorens maksimalt tilladte belastning.

### 5.1.2 Asynkronmotorers virkningsgrad

I figur 5.1.2.1 ses virkningsgrader for tre størrelser af 4-polede IE3 asynkronmotorer som funktion af belastningsgraden. For alle tre motorer ses, at virkningsgraden er nogenlunde konstant ved belastningsgrader mellem 75% og 125%.

Når belastningsgraden nærmer sig 25% reduceres virkningsgraden betydeligt. Den største reduktion ses dog for den lille motor.



Figur 5.1.2.1 Virkningsgrad for 4-polede standard asynkronmotorer som funktion af belastningsgraden.

Ovenstående forhold viser, at motorstørrelsen om muligt bør vælges således at belastningen under drift ligger mellem 75-100%.

## 5.2 PM-motorer (PermanentMagnet motorer)

Den traditionelle asynkronmotor med aluminium rotor er i dag langt den mest udbredte og solgte elmotor, men den mere energieffektive motortype – permanentmagnet motoren (PM motoren) – forventes i de kommende år at vinde mere indpas.

Flere motorfabrikanter i Europa, USA og Asien markedsfører PM motorer, som kan erstatte den traditionelle asynkronmotor. Motoren vinder indpas fordi produktionen af robuste permanente magneter bliver bedre og billigere samtidig med at prisen på den nødvendige elektriske styring også er for hastigt nedadgående.

Som navnet indikerer, er PM-motoren en motor udstyret med permanente magneter i/på rotoren. Motoren forsynes via en elektrisk styring (frekvensomformer), da den ikke kan net-tilsluttes og findes både i udformning som en DC-motor og AC-motor. I udlægningen som AC-motor fungerer motoren som en synkronmotor, blot uden fremmedmagnetisering af rotoren.



Figur 5.2.1 PM motor

### 5.2.1 PM-motorens momentkurve

Som nævnt fungerer en PM-motor ligesom en synkronmotor. Dette betyder at man i modsætning til asynkronmotoren ikke opererer med et slip, men kører ved et eksakt omløbstal bestemt af statorfeltets frekvens og antallet af poler. Den højre flanke af momentkurven er for en PM-motor en lodret linje. Det maksimalt ydede moment kan styres med statorspændingen. Omdrejningerne bestemmes eksakt af frekvensen på den af frekvensomformerens leverede spænding. Med andre ord er PM-motoren født med et variabelt arbejdsområde, svarende til den frekvensomformer-drevne asynkronmotor.

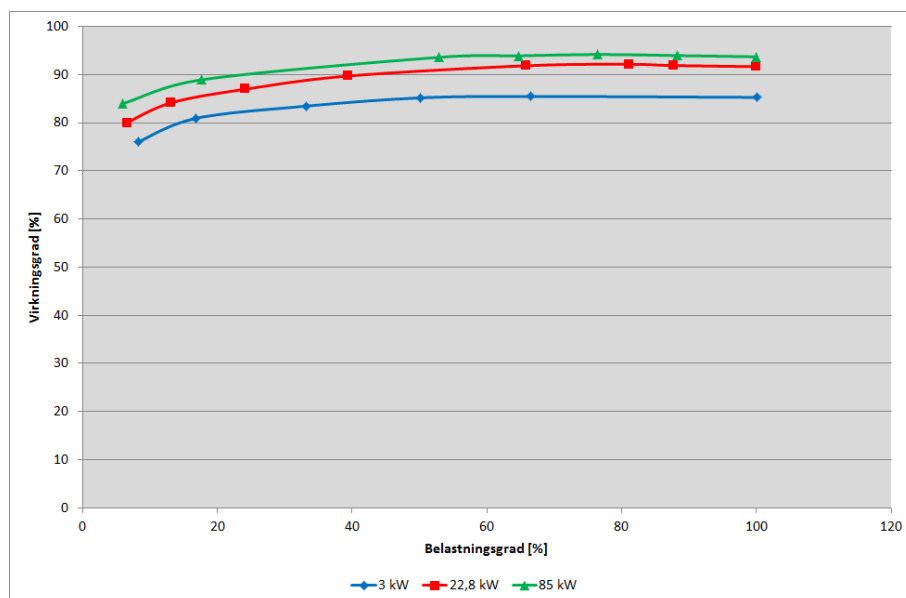
På grund af de permanente magneter i rotor kan der for PM-motoren skabes en stærkere magnetisk kraft rotor og stator imellem end tilfældet er for asynkronmotoren, hvor hele energien skal tilføres igennem statoren og overføres til rotoren via induktion. Dette bevirker at PM-motoren i de samme byggestørrelser kan udføres mere kompakt og udføre et relativt større drejningsmoment end asynkronmotoren.

### 5.2.2 PM-motorens effektivitet

PM-motoren er asynkronmotoren overlegen i energimæssig henseende. Dette skyldes, at den ikke benytter sig af induktion for frembringelse af rotorens magnetfelt. Der tabes ved induktion altid energi i luftgabet mellem stator og rotor. Fænomenet er relativt størst ved de mindre motorer, hvor asynkronmotorens maksimale virkningsgrad som bekendt kommer under 70 – 80%. Luftgabet for disse små motorer er pga. produktionstolerancer relativt stort set i forhold til den effekt som skal overføres fra stator til rotor.

For asynkronmotoren forefindes endvidere tab som følge af elektriske strømme i rotorviklingen. Dette fænomen optræder heller ikke for en PM-motor. Alt i alt kan en PM-motor, hvad angår maksimal virkningsgrad forventes at være 3-7 procentpoint bedre end en IE2 motor og 1-3 procentpoint bedre end en IE3 motor. Forskellen i effektivitet mellem asynkronmotorer og permanentmagnetmotorer er størst for de små motorer.

I figur 5.2.2.1 ses virkningsgrader for tre størrelser af 4-polede PM-motorer inkl. frekvensomformer som funktion af belastningsgraden. For alle tre drev (motor og frekvensomformer) ses, at virkningsgraden er nogenlunde konstant ved belastninger mellem 50-125 %. Når belastningen nærmer sig 25% sker der en beskeden reduktion i virkningsgraderne for de tre drev. Belastningen skal under 10% før der for alvor sker fald i virkningsgraderne.



Figur 5.2.2.1 Virkningsgrad for 4-polede PM-motorer inkl. frekvensomformere.

### 5.3 Synkronreluktans motorer

En synkronmotor er en vekselstrømsmotor i hvilken rotoren roterer med det samme omdrejningstal, som det roterende felt (statorfelt) i maskinen. En anden måde at sige dette på er, at motoren ikke har en "slip" under sædvanlige driftsbetingelser.

Hastigheden af den synkrone motor afhænger direkte af antallet af magnetiske poler og kildefrekvensen. Opbygningen af statoren af synkrone reluktansmotorer er næsten identisk med opbygningen i en induktionsmotor. Rotoren består af en rund lamineret kerne, og synkronmotorerne skal drives af en frekvensomformer for at kunne starte.

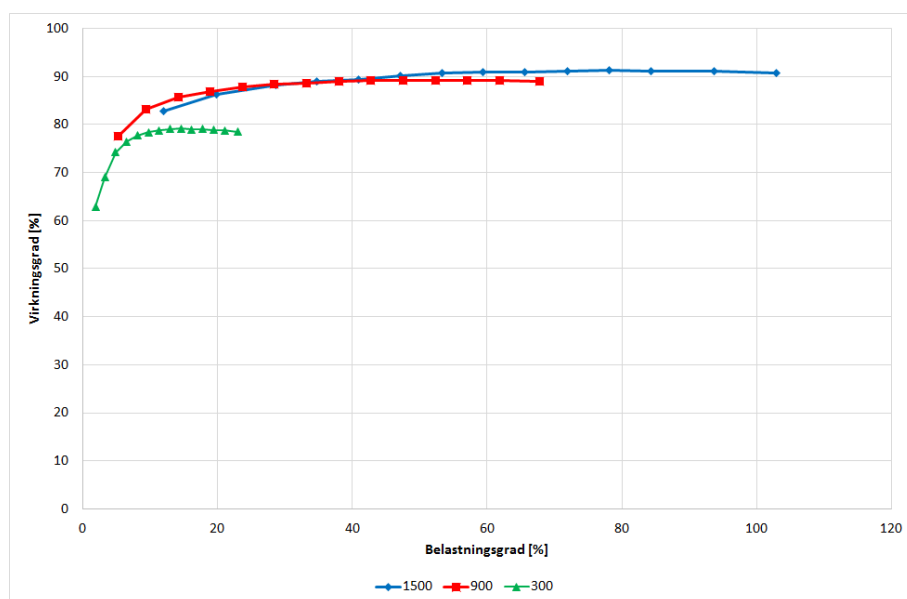
Funktionen af reluktansmotorer er relativt enkel. Når der påføres en spænding til en vikling i statoren, løber en strøm. Strømmen genererer en magnetisk flux, der strømmer gennem stator og rotor. Rotoren drejer i den retning, hvori den magnetiske modstand for den magnetiske flux bliver mindre. Dette skaber drejningsmoment, som vender tilbage til nul, når rotoren når positionen med laveste magnetiske modstand. For at opnå en kontinuerlig roterende bevægelse skal der tilføres en spænding til den næste vikling. Og hvor en asynkronmotor har et slip, der er afhængig af belastningen, er en reluktansmotor synkron, hvilket vil sige at en 4 polet motor kører 1.500 omdr./min. ved 50 Hz og 3.000 omdr./min. ved 100 Hz.



Figur 5.3.1 Synkronreluktans motor

### 5.3.1 Synkronreluktans motorens effektivitet

Den nedenstående figur viser virkningsgraden for en 15 kW 4-polet synkron reluktansmotor inklusiv frekvensomformer ved tre forskellige omdrejningstal som funktion af belastningsgraden. Ved alle tre hastigheder er virkningsgraden nogenlunde konstant i store dele af belastningsgradsområderne.



Figur 5.3.1.1 Virkningsgrad for en 15 kW synkron reluktansmotor inkl. frekvensomformer.

## 6 Klassificering af motorer

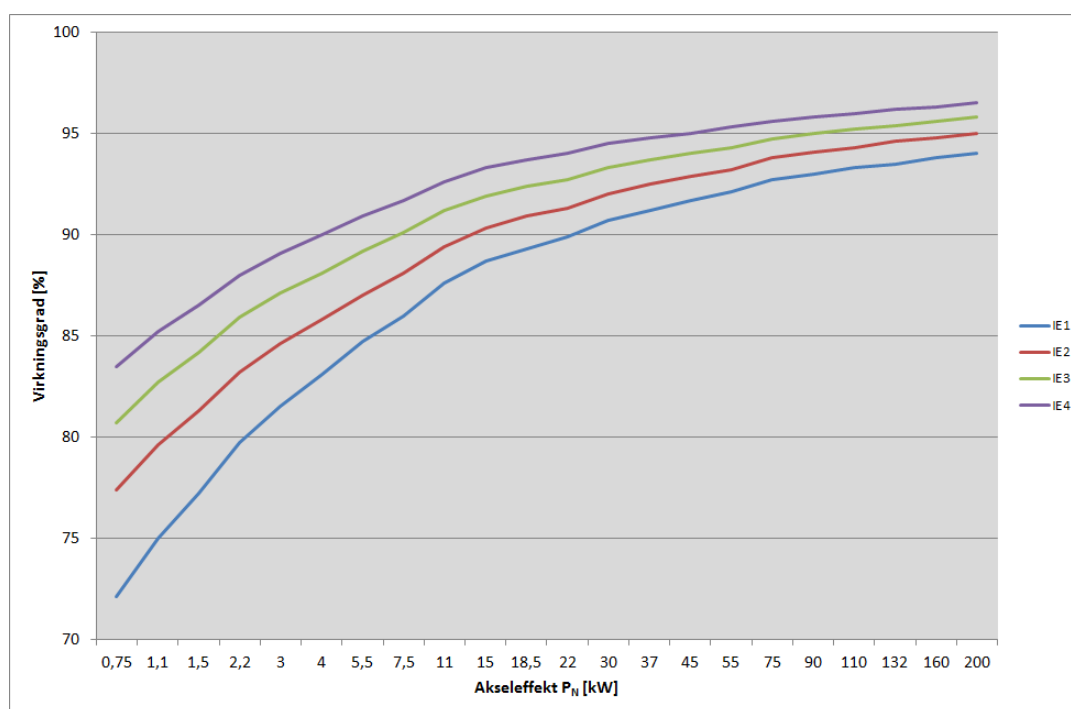
I 2008 blev der med vedtagelsen af den internationale standard IEC 60034-30:2008 indført ny effektivitetsklasser IE1, IE2 og IE3.

I IEC 60034-31-1:2010 "Technical specification" ses endvidere en definition for effektivitetsklassen IE4 "Super premium efficiency", som gælder for asynkron- og synkronmotorer.

Klasse	Beskrivelse af motorens effektivitet	Betegnelse
1	Super premium efficiency	IE4
2	Premium efficiency	IE3
3	High efficiency	IE2
4	Standard efficiency	IE1

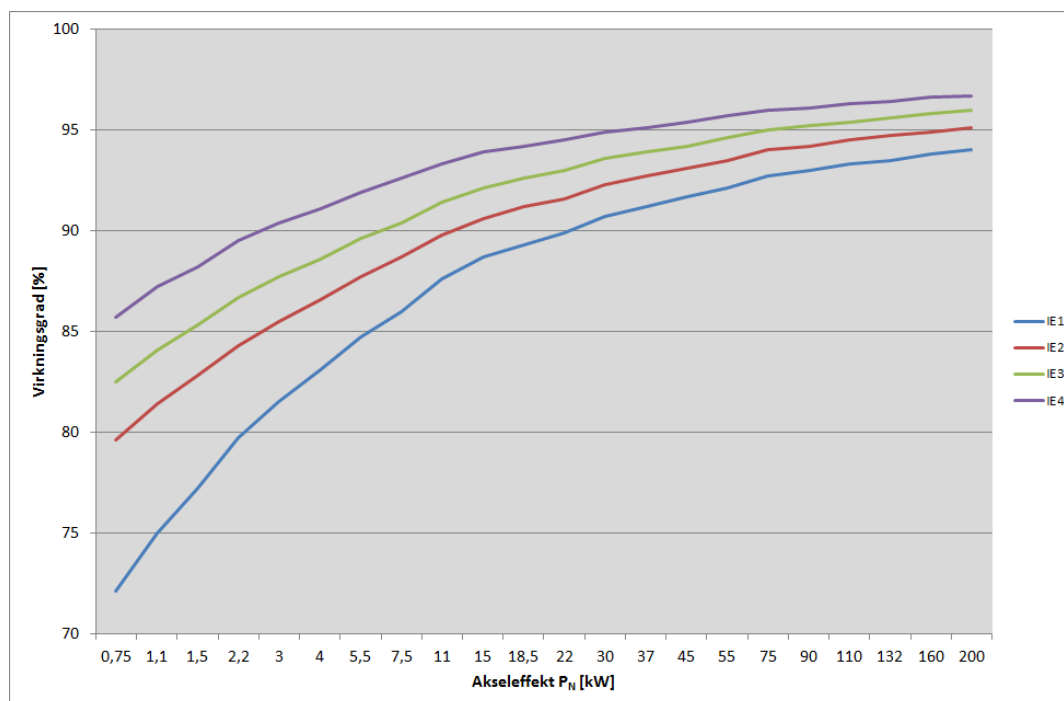
Tabel 6.1 Inddeling af motorer i effektivitetsklasser.

Nedenstående figurer viser de krævede virkningsgrader for elmotorer i de fire effektivitetsklasser jf. IEC 60034-30:2008 og IEC 60034-31:2010.



Figur 6.2 Virkningsgrader for 2-polede motorer efter IEC 60034-30:2008 og IEC 60034-31:2010.





Figur 6.3 Virkningsgrader for 4-polede motorer efter IEC 60034-30:2008 og IEC 60034-31:2010.

I juni 2011 blev der i EU indført krav om miljøvenligt design (Ecodesign) af elmotorer. Ecodesign er krav om produktudformning, der tilgodeser eksempelvis energieffektivitet. Kravene gælder almindelige trefasede elmotorer med én hastighed i størrelsen 0,75 kW til 375 kW. Kravene gælder også, hvis motoren er indbygget i et produkt, så længe det er muligt uden større besvær at måle motorens energieffektivitet særskilt.

## 6.1 Frekvensomformerdrift

Ændring af forsyningsfrekvensen til en motor, er den mest fleksible og energimæssigt bedste måde til ændring af omløbstallet. Når frekvensen ændres, vil motorens omløbstal ændres med denne.

De mest udbredte styrestrategier er:

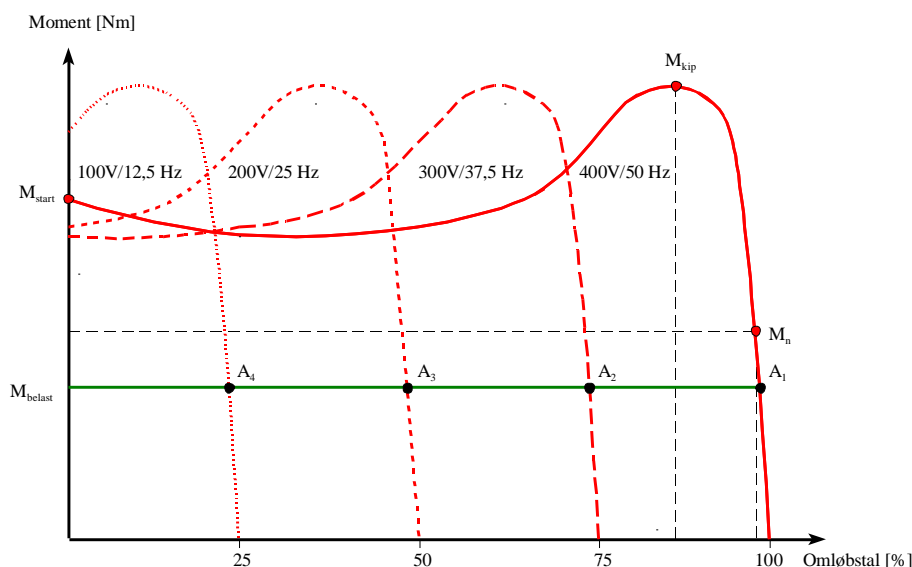
- Konstant spændings-frekvensforhold
- Kvadratisk spændings-frekvensforhold
- Automatisk Energi Optimering (AEO)

### 6.1.1 Konstant spændings-frekvensforhold

Formålet med at anvende en styrestrategi, hvor spændings-frekvensforholdet holdes konstant er, at motoren skal kunne levere et konstant nominelt moment i hele arbejdsområdet, dvs. ved alle omløbstal. Denne styrestrategi kan anvendes til alle typer belastninger, men er virkningsgradsmæssigt mest fordelagtig at anvende ved belastninger med konstant momentkarakteristik, som f.eks. transportbånd og trykluftkompressorer.

I 6.1.1.1 er vist et eksempel på frekvensregulering af et transportbånd, der er karakteriseret ved at have behov for samme moment ved alle omløbstal. Motoren styres af en frekvensomformer med konstant spændings-frekvensforhold, hvilket giver en trinløs hastighedsstyring.

På figuren ses, at momentkurven for motoren "trækker mod venstre" i takt med at motorens omløbstal nedreguleres.



Figur 6.1.1.1 Frekvensregulering af transportbånd hvor spændings-frekvensforholdet holdes konstant.

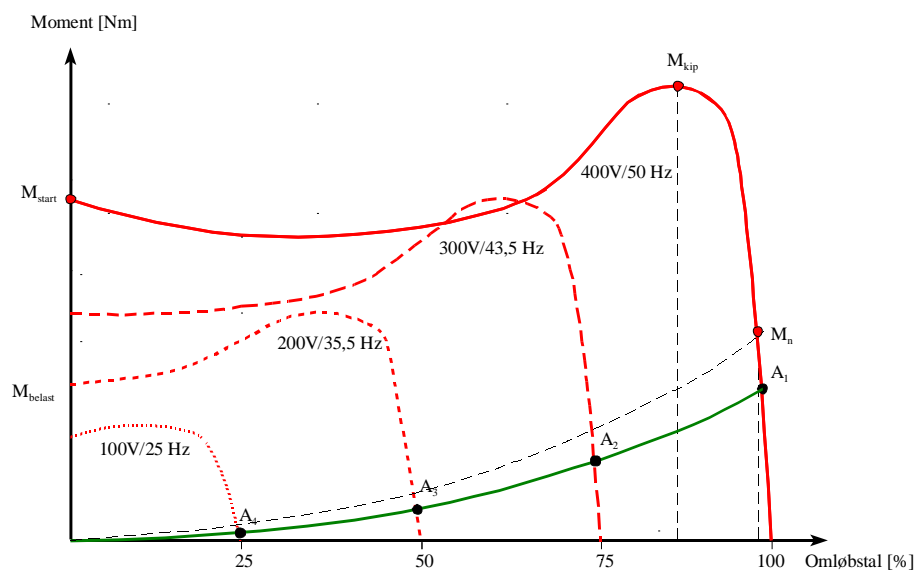
Når man nærmer sig meget lave frekvenser (typisk  $< 10$  Hz) skal man være opmærksom på, at motorspændingen kan blive så lav at magnetiseringen af motoren bliver utilstrækkelig. Dette vil medføre at motoren stopper. Frekvensomformere kompenserer automatisk for dette ved at hæve motorspændingen ved lave frekvenser.

### 6.1.2 Kvadratisk spændings-frekvensforhold

Til belastninger hvor momentbehovet falder med omløbstallet bør der ikke anvendes en styrestrategi med fast spændings-frekvensforhold, da dette typisk vil medføre en unødvendig høj magnetisering af motoren ved lavere omløbstal, og dermed større tab i motoren med forringet virkningsgrad til følge. Ved denne type belastninger kan der med fordel anvendes en styrestrategi, hvor motorens magnetisering og dermed motorens maksimale momentydelse falder med omløbstallet. Denne styrestrategi anvendes hovedsageligt ved belastninger med kvadratisk momentkarakteristik, som f.eks. ventilatorer og pumper uden løftehøjde.

I 6.1.2.1 er vist et eksempel på frekvensregulering af et ventilationsanlæg, der er karakteriseret ved at have behov for reduceret moment ved reducerede omløbstal. Motoren styres af en frekvensomformer med kvadratisk spændings-frekvensforhold, hvilket giver en trinløs hastighedsstyring.

Det ses, at momentkurven for motoren "trækker mod venstre og nedad" i takt med at motorens omløbstal nedreguleres.



Figur 6.1.2.1 Frekvensregulering af ventilationsanlæg hvor spændings-frekvensforholdet varieres.

I pumpesystemer, f.eks. transport- og trykforøgersystemer, vil der være en statisk løftehøjde. For denne type systemer vil belastningens moment derfor ikke aftage kvadratisk og styrestrategien må derfor tilpasses dette forhold.

### 6.1.3 Automatisk Energi Optimering (AEO)

Frekvensomformerdrift med fast spændings-frekvensforhold til belastninger med konstant momentkarakteristik og varierende spændings-frekvensforhold til belastninger ved kvadratisk momentkarakteristik, sikrer som udgangspunkt gode, men ikke nødvendigvis maksimalt opnåelige virkningsgrader for det samlede drev (motor og frekvensomformer) ved varierende belastninger.

Maksimal opnåelig virkningsgrad for det samlede drev opnås, når forholdet mellem motorspændingen og frekvensen er optimal, dvs. når der lige netop sendes den nødvendige spænding ud til motoren, der kræves for at opretholde moment og omløbstal i arbejds punktet.

I nyere frekvensomformere er der typisk indbygget Automatisk Energi Optimering (AEO), hvor frekvensomformerer beregner det optimale forhold mellem motorspændingen og frekvensen i det enkelte arbejds punkt. Dette sikrer, at motor og frekvensomformer kører med den højst opnåelige virkningsgrad uanset belastningen.

Faren ved denne styringsstrategi kan være, at der ikke er nok energi i motorens magnetfelt til at korrigere for pludselige og kraftige ændringer i belastningen. Skulle dette ske, kan man risikere at "tæbe" motoren med produktionsstop til følge.

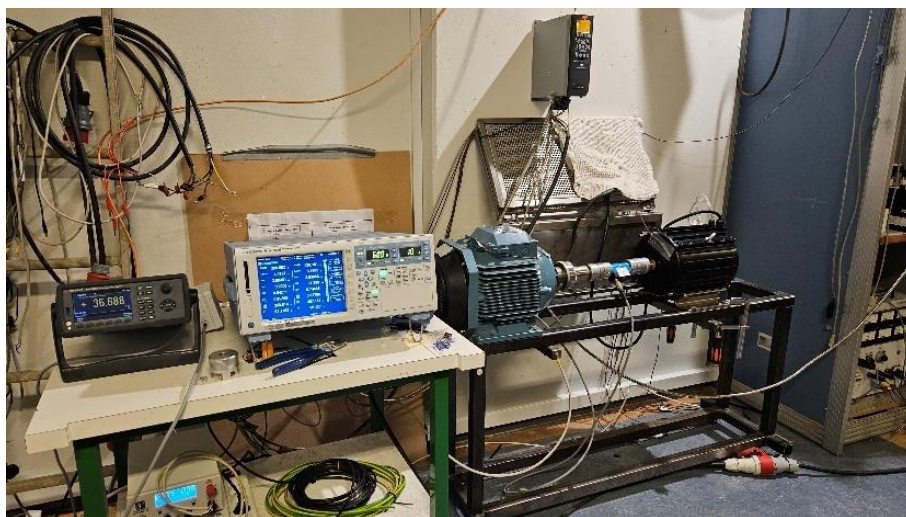
## 7 Afprøvninger i Drives-lab

Der er gennemført motortests i Drives-lab på Teknologisk Institut af tre forskellige elmotor med og uden frekvensomformer, og ved varierende belastninger.

Testene har skulle vise hvorledes motorernes virkningsgrad afhænger af belastningen, dvs. af motorernes moment og omdrejningstal. Der er desuden udført tests af virkningsgraden af en frekvensomformer under de varierende belastninger, som motorerne er testet ved.

Frekvensomformerer er ligeledes testet med og uden automatisk energi optimering (AEO), hvor spændingen fra frekvensomformerer reguleres så magnetiseringen af motoren tilpasses belastningen.

De testede elmotorer er henholdsvis en 4-polet 3 kW asynkronmotor, en 6-polet 3 kW asynkronmotor samt en 3 kW 100 Hz permanentmagnet motor med 1.200 omdr./min.

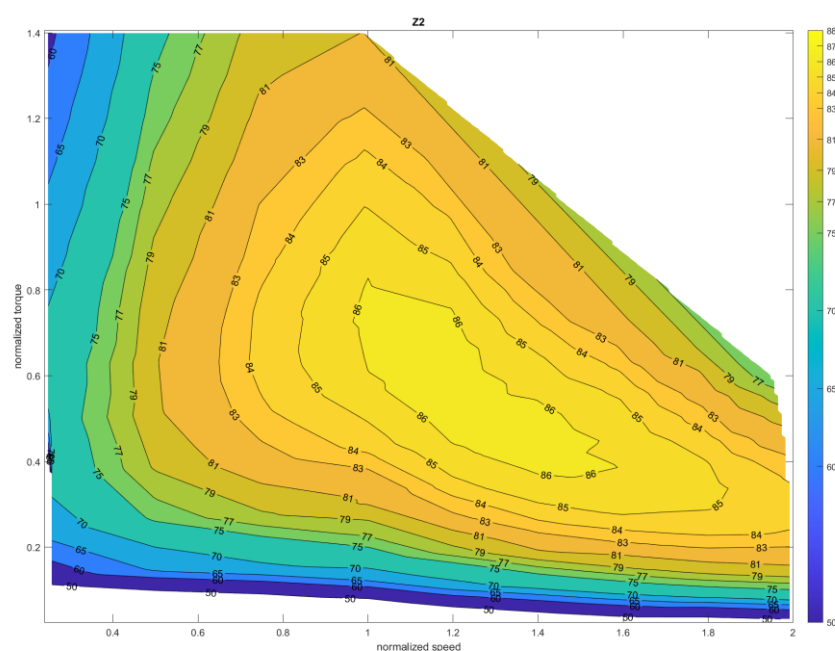


Figur 6.1.1 Drives-lab

### 7.1 4-polet asynkronmotor

Der er foretaget tests af den 4-polede asynkronmotor, hvor motoren er blevet belastet med 13 forskellige momenter mellem ca. 0,5 – 27 Nm ved omdrejningshastigheder på henholdsvis 25%, 50%, 75%, 100%, 120%, 140%, 160%, 180% og 200% af nominel hastighed.

Herved er motoren testet i meget stort antal driftspunkter ved hastigheder og momenter, således at det er muligt at udfærdige nedenstående konturplot for motorens virkningsgrad som funktion af omdrejningshastighed og moment.

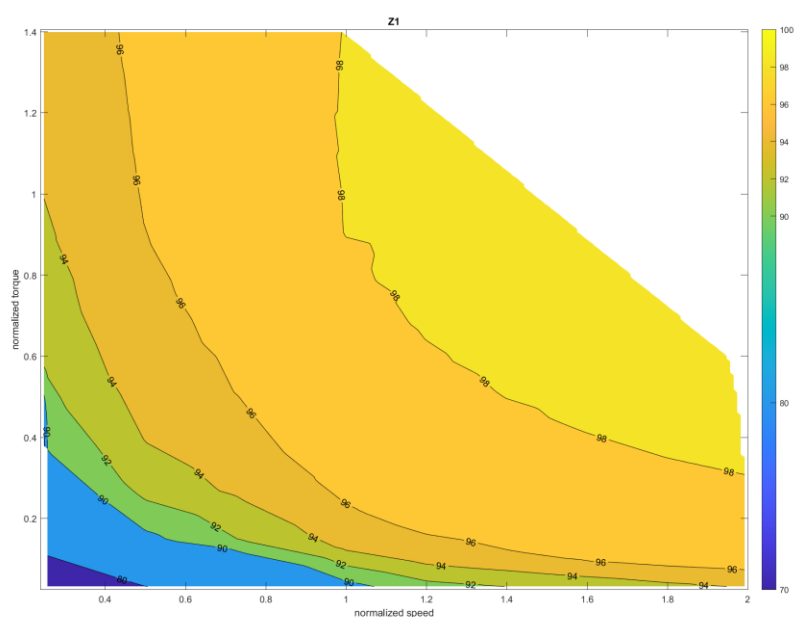


Figur 7.1.1 Konturplot for virkningsgraden af den testede 4-polede asynkronmotor.

Det ses, at motorens virkningsgrad som ventet reduceres, hvis den driftes ved lav belastning, dvs. lavt moment og lav hastighed. Men det ses ligeledes, at motorens virkningsgrad øges i forhold til drift ved nominelt moment og nominel hastighed ved at reducere moment og til gengæld øge hastigheden, så samme belastning opnås. Denne effekt, som tidligere været omtalt i litteraturen, er hermed eftervist.

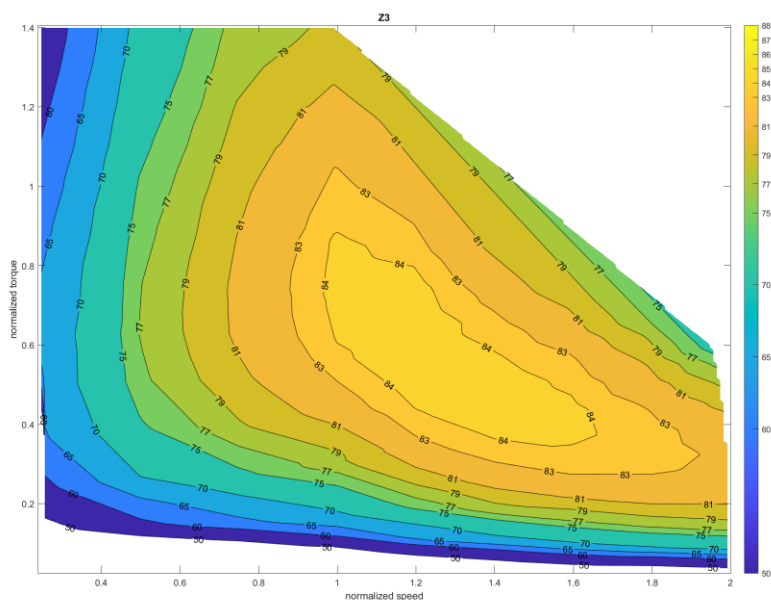
Det betyder således, at det er muligt at øge virkningsgraden af en elmotor der skal yde en given effekt ved at øge omdrejningshastigheden, så motoren driftes oversynkront op til omkring 120%, dvs. 1.800 omdr./min. for en 4-polet motor.

Da virkningsgraden for f.eks. en pumpe ligeledes øges ved højere omdrejningshastighed vil virkningsgraden af det samlede system forbedres.



Figur 7.1.2 Konturplot for virkningsgraden af den anvendte frekvensomformer.

Det ses af figur 7.1.2, at virkningsgraden af frekvensomformeren ikke overraskende er højst, når frekvensomformeren driftes under høj belastning. Det skyldes, at tabene i frekvensomformeren er stort set konstante uanset belastningen.

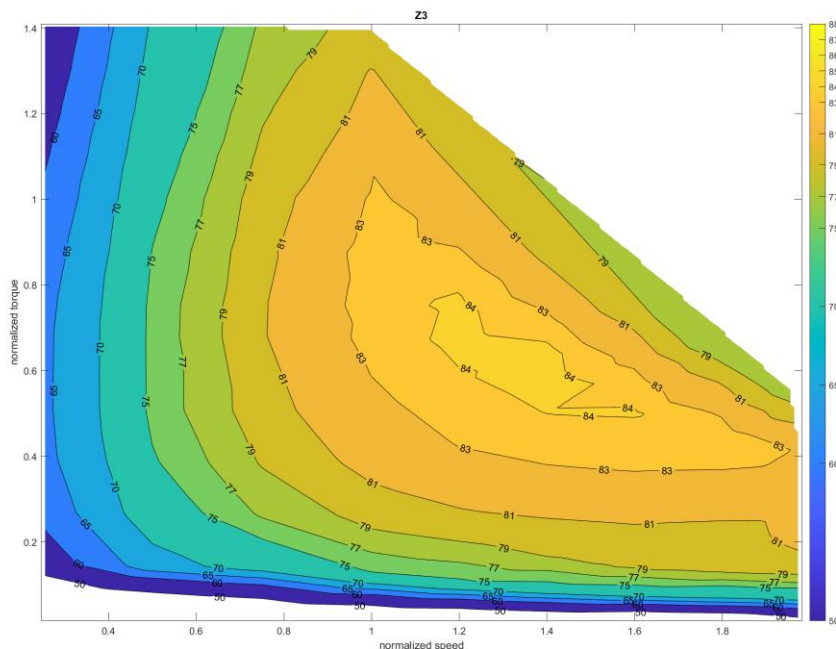


Figur 7.1.3 Konturplot for den samlede virkningsgrad af motor og frekvensomformer uden AEO.

Figur 7.1.3 viser den samlede virkningsgrad for motor og frekvensomformer, når systemet driftes uden brug af AEO, dvs. uden optimering af spændingen fra frekvensomformeren til motoren.

Det ses, at konturplottet er stort set identisk med det tilsvarende plot for motoren, se figur 7.1.1, idet virkningsgraden ved lav belastning dog er lidt forringet.

Figur 7.1.4 viser systemvirkningsgraden når AEO-funktionen er tilkoblet. Det ses som ventet, at virkningsgraden ved lave belastninger er forbedret en smule.

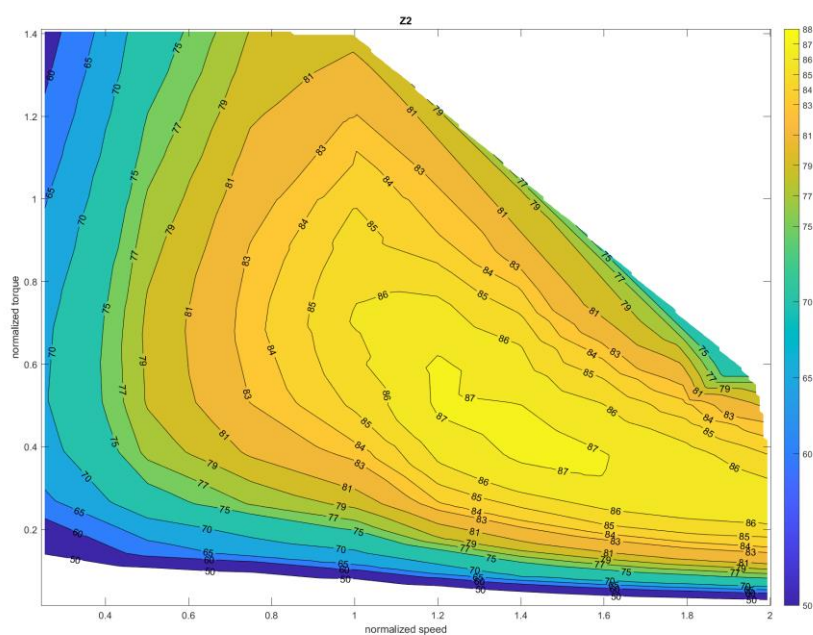


Figur 7.1.4 Konturplot for den samlede virkningsgrad af motor og frekvensomformer med AEO.

## 7.2 6-polet asynkronmotor

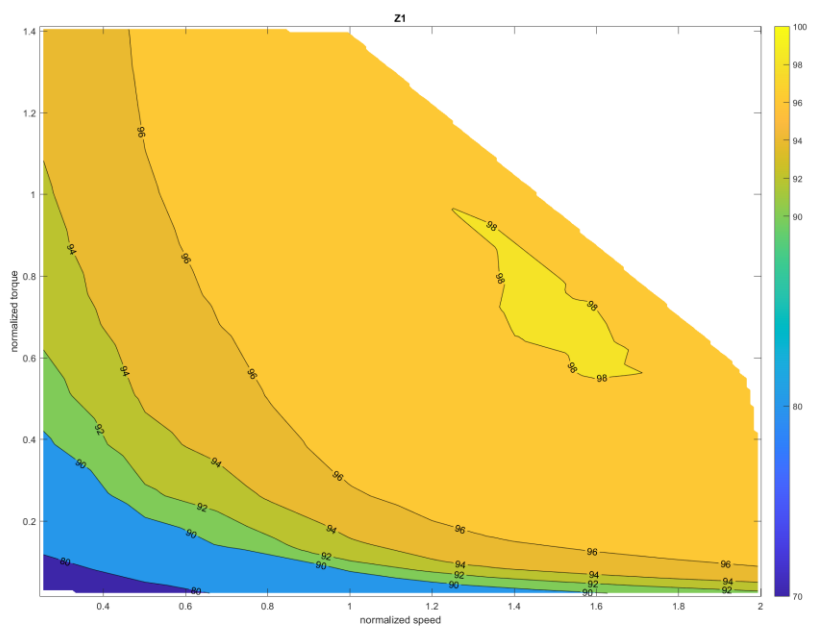
Dernæst er der foretaget tests af en 6-polet asynkronmotor, der ligesom den 4-polede motor er testet i 13 driftspunkter med momenter mellem ca. 0,5 – 40 Nm ved omdrejningshastigheder på henholdsvis 25%, 50%, 75%, 100%, 120%, 140%, 160%, 180% og 200% af nominal hastighed.

Figur 7.2.1 viser et konturplot for virkningsgraden af den testede 6-polede elmotor som funktion af omdrejningshastigheden og momentet.



Figur 7.2.1 Konturplot for virkningsgraden af den testede 6-polede asynkronmotor.

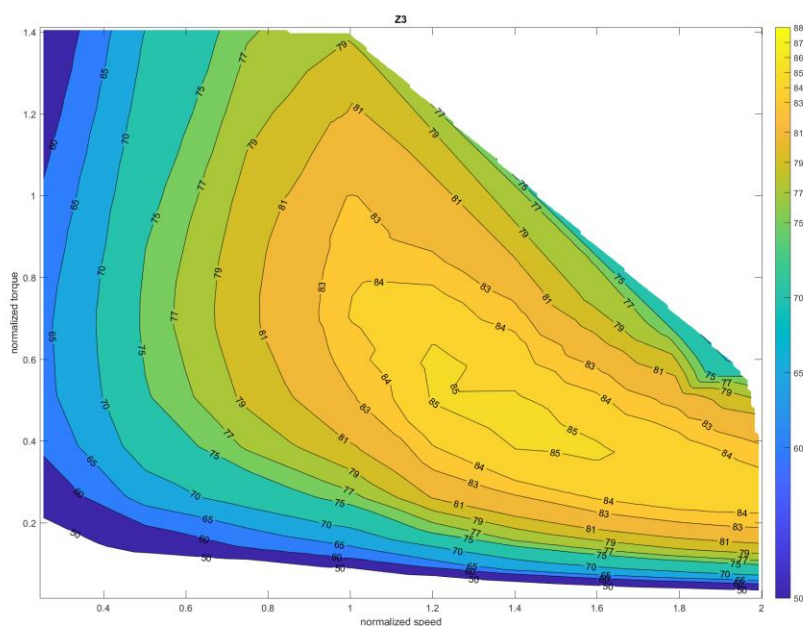
Det ses, at motorens virkningsgrad ligesom for den 4-polede motor forringes, hvis den driftes ved lav belastning. Motorens virkningsgrad kan ligeledes optimeres ved at reducere momentet og samtidig øge omdrejningshastigheden, hvilket som tidligere nævnt medfører en samlet højere systemvirkningsgrad, hvis motoren f.eks. driver en pumpe.



Figur 7.2.2 Konturplot for virkningsgraden af den anvendte frekvensomformer.



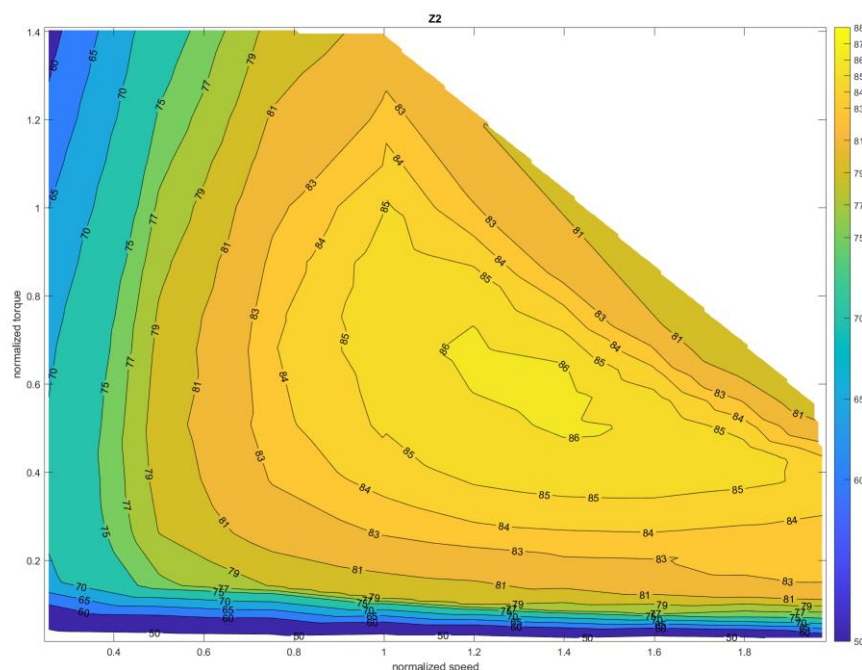
Figur 7.2.2 viser virkningsgraden af frekvensomformeren, når den driver en 6-polet motor. Det ses, at virkningsgraden generelt er lidt lavere end når den driver en 4-polet motor.



Figur 7.2.3 Konturplot for den samlede virkningsgrad af motor og frekvensomformer uden AEO.

Figur 7.2.3 viser den samlede virkningsgrad for den 6-polede motor og frekvensomformer, når systemet driftes uden brug af AEO. Det ses, at virkningsgraden ved lav belastning påvirkes af tabene i frekvensomformeren.

Figur 7.2.4 viser systemvirkningsgraden når AEO-funktionen er tilkoblet. Det ses, at AEO-funktionen har stor effekt på virkningsgraden ved lave belastninger, idet virkningsgraden af motoren er klart forbedret.



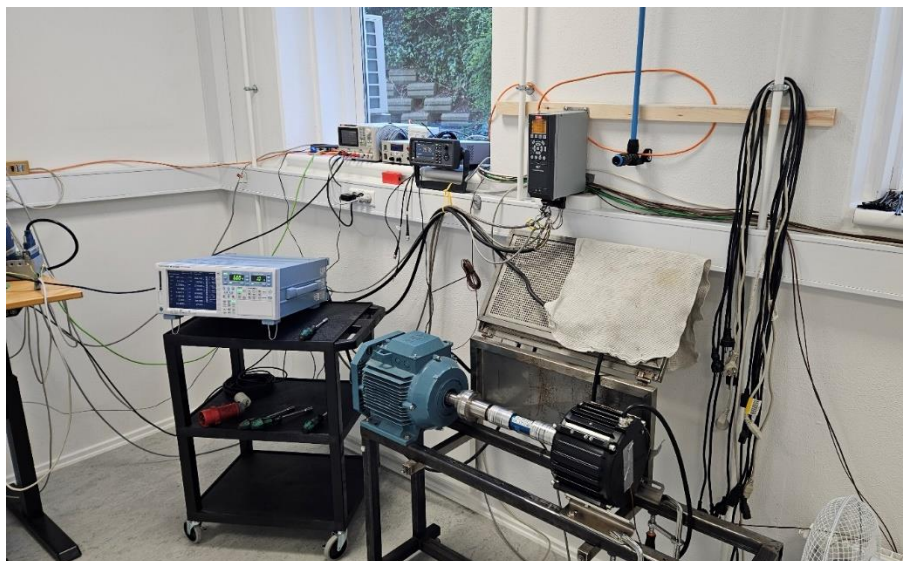
Figur 7.2.4 Konturplot for den samlede virkningsgrad af motor og frekvensomformer med AEO.

### 7.3 Permanentmagnet motor

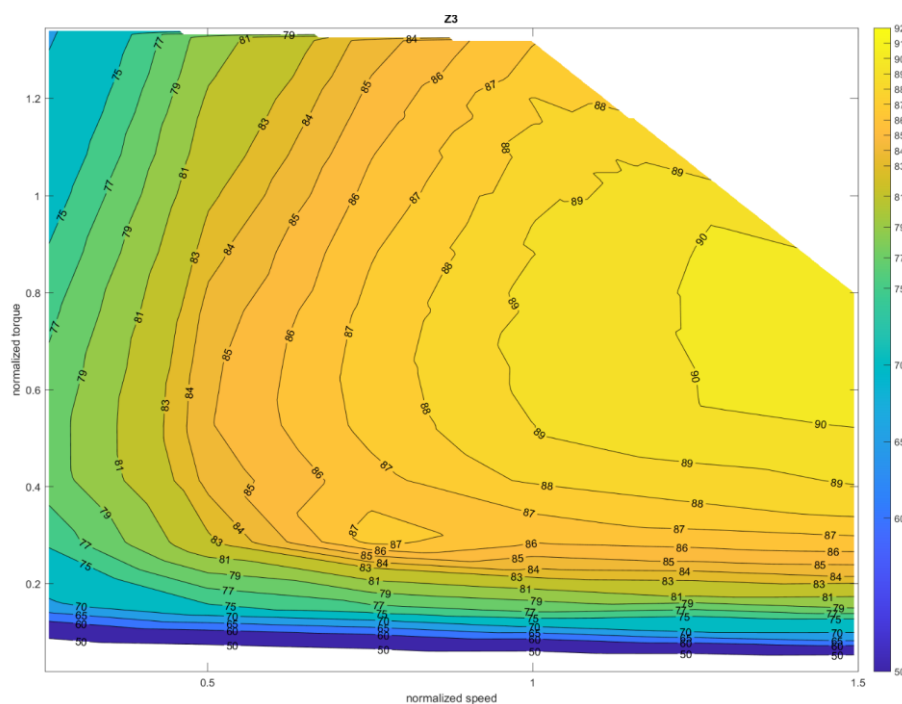
Endelig er der foretaget tests af en permanentmagnetmotor, der ligesom de to asynkronmotorer er testet i 13 driftspunkter med momenter mellem ca. 0,5 – 30 Nm ved omdrejningshastigheder på henholdsvis 25%, 50%, 75%, 100%, 125% og 150% af nominel hastighed.

Da permanentmagnetmotoren var en 100 Hz motor med en nominel hastighed på 1.200 omdr./min. har det som følge af begrænsninger i den anvendte frekvensomformer ikke været muligt at teste motoren ved højere omdrejninger end svarende til 150% af nominel hastighed.

Figur 7.3.1 viser et konturplot for virkningsgraden af den testede permanentmagnetmotor som funktion af omdrejningshastigheden og momentet.



Figur 7.3.1 Test af PM-motor.

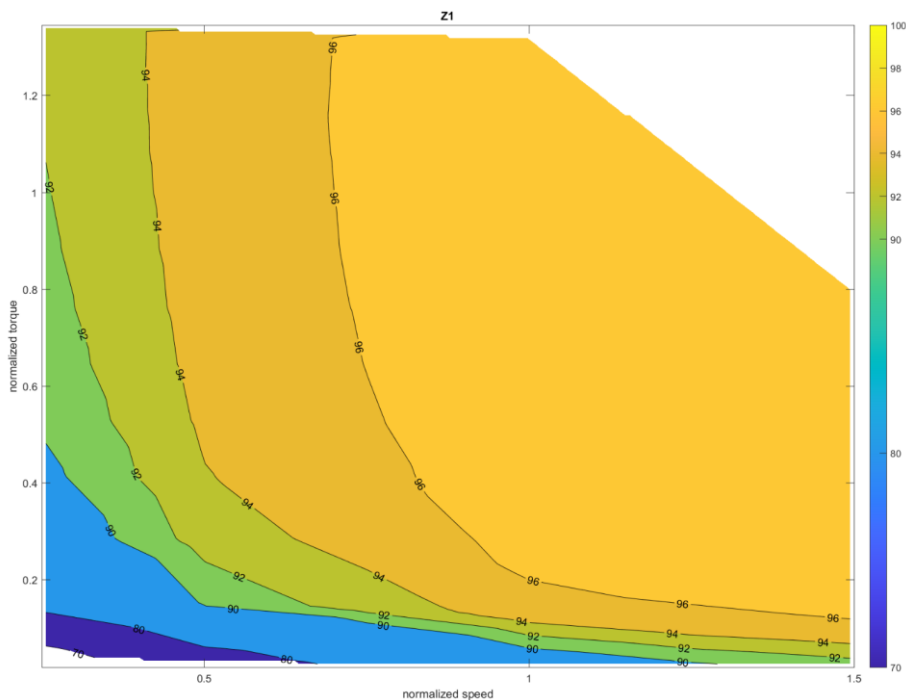


Figur 7.3.2 Konturplot for virkningsgraden af den testede PM motor.

Det ses, at motorens virkningsgrad ligesom for asynkronmotorerne forringes, hvis den driftes ved lav belastning.

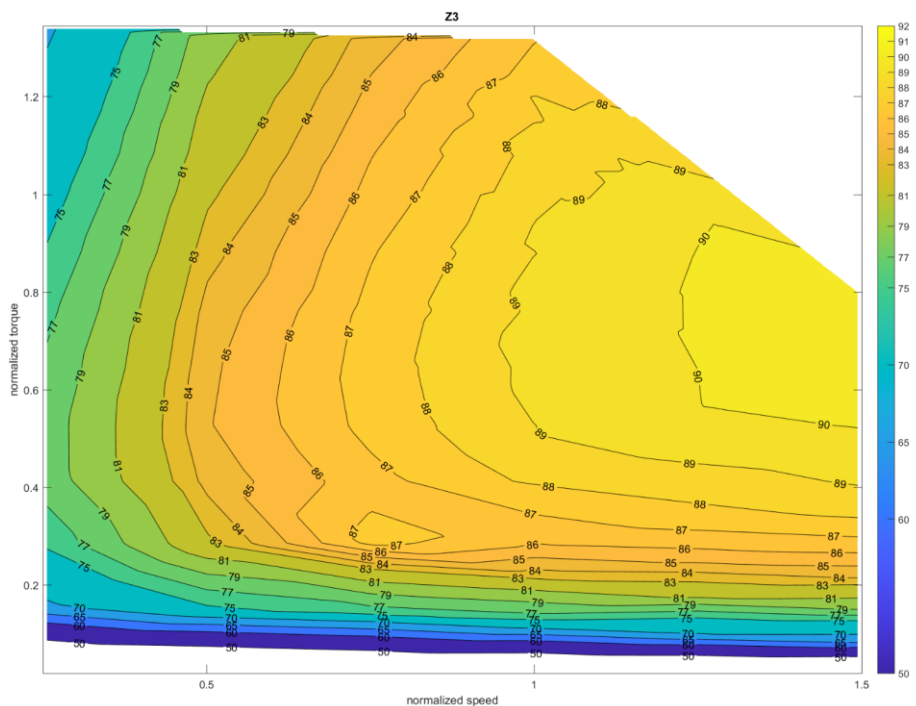
Motorens virkningsgrad er dog både højere over hele belastningsområdet og den høje virkningsgrad bibeholdes ned til meget lave belastninger.

Motorens virkningsgrad kan ligeledes optimeres ved at reducere momentet og samtidig øge omdrejningshastigheden, hvilket som tidligere nævnt medfører en samlet højere systemvirkningsgrad.



Figur 7.3.3 Konturplot for virkningsgraden af den anvendte frekvensomformer.

Figur 7.3.3 viser virkningsgraden af frekvensomformereren, når den driver en permanentmagnetmotor. Det ses, at virkningsgraden generelt er lidt lavere end når den driver en asynkronmotor.



Figur 7.3.4 Konturplot for den samlede virkningsgrad af en PM-motor og frekvensomformer.

Figur 7.3.4 viser den samlede virkningsgrad for PM motoren og frekvensomformereren. Det ses, at virkningsgraden ved lav belastning som forventet påvirkes af tabene i frekvensomformereren.

## 8 WBG-frekvensomformere

### 8.1 WBG-teknologien

Frekvensomformere med WBG (Wide Band Gap) teknologi er en avanceret type elektriske omformere, der anvender halvleder materialer som siliciumcarbid (SiC) og galliumnitrid (GaN) i stedet for det mere traditionelle silicium (Si). Disse materialer bruges til at skabe halvledertrin, der kan fungere ved højere spændinger, frekvenser og temperaturer sammenlignet med deres modstykker af silicium. Det gør dem særligt nyttige inden for effektelektronik, herunder frekvensomformere.

#### Vigtige egenskaber ved WBG-materialer

1. **Stort båndgab**

Båndgabets er energiforskellen mellem valensbåndet og ledningsbåndet i en halvleder. SiC og GaN har båndgab på henholdsvis ca. 3,3 eV og 3,4 eV sammenlignet med siliciums 1,1 eV. Denne egenskab gør det muligt for enhederne at fungere ved højere temperaturer og spændinger og med lavere lækstrøm

2. **Høj nedbrydningsspænding**

Det større båndgab resulterer i en højere elektrisk feltstyrke før nedbrydning, hvilket muliggør drift med højere spænding.

3. **Høj varmeledningsevne**

SiC har en varmeledningsevne på ca. 3,7 W/cm-K, hvilket er betydeligt højere end siliciums 1,5 W/cm-K. Det giver bedre varmeafledning og reducerer behovet for omfattende kølesystemer

4. **Høj switchfrekvens**

WBG-enheder kan tænde og slukke meget hurtigere end silicium-enheder, hvilket er en fordel for højfrekvente applikationer

5. **Høj effektivitet**

De reducerede tab under switch og ledning af strøm resulterer i højere effektivitet.

#### Anvendelse i frekvensomformere

Ved at anvende halvledere med WBG-teknologi i frekvensomformere opnås, udover ovennævnte, også en række afledte fordele. Herunder listes hvorledes WBG-teknologi forbedrer frekvensomformere.

a. **Højere effektivitet**

De reducerede koblingstab og forbedrede termiske styringsegenskaber i WBG-materialer fører til mere effektive omformere. Dette resulterer i mindre tabseffekt og dermed reducerede krav til køling

b. **Højere driftstemperaturer**

c. WBG-enheder kan fungere ved højere temperaturer uden at miste ydelse. Dette reducerer behovet for køleudstyr, hvilket kan føre til mindre og lettere designs

d. **Kompakt design**

- e. Den høje effekttæthed og effektivitet giver mulighed for mindre og lettere omformere, hvilket er en fordel i applikationer, hvor plads og vægt er afgørende.

f. **Højere switchfrekvens**

WBG-baserede konvertere kan arbejde ved højere frekvenser, hvilket muliggør brug af fysisk mindre passive komponenter som kondensatorer og spoler i forbindelse med f.eks. filtre. Dette kan reducere størrelsen og vægten af frekvensomformerer. Den højere switchfrekvens kan tilmed forbedre den dynamiske respons på enheden

g. **Forbedret pålidelighed**

Muligheden for at arbejde ved højere temperaturer og spændinger er egenskaber der tilmed burde forbedre omformerens pålidelighed og levetid.

### Applikationer

Frekvensomformere med WBG-teknologi forudses fremadrettet at kunne anvendes i en række industrier og applikationer, herunder:

➤ **Elbiler**

Effektive frekvensomformere kan forbedre rækkevidden og ydeevnen for elbiler

➤ **Vedvarende energi**

Mindre og mere effektive omformere til sol- og vindenergi kan reducere omkostningerne og forbedre energiudbyttet

➤ **Industrielle motordrev**

WBG-omformere bruges til at styre elmotorers hastighed og drejningsmoment og forbedrer effektiviteten og reducerer størrelsen på disse drev. De højere switchfrekvenser giver mulighed for bedre dynamisk respons, motorstyring og energibesparelser.

### Udfordringer

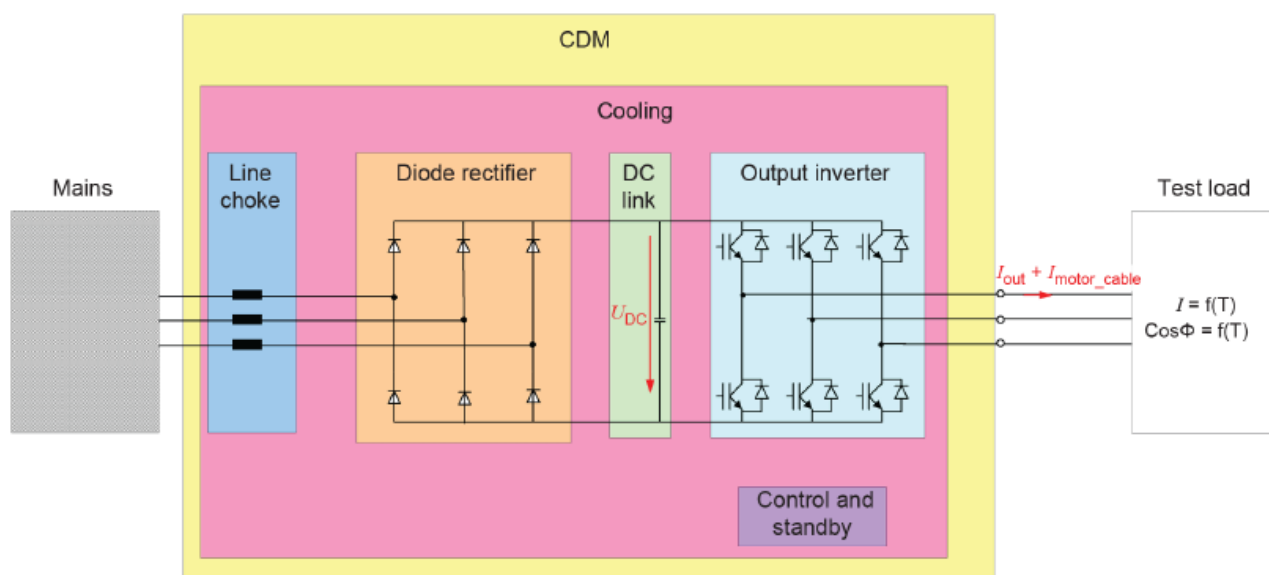
På trods af de mange fordele er der også udfordringer forbundet med WBG-teknologien. Produktionen af WBG-materialer og -enheder er fortsat dyrere end silicium selvom tendensen er nedadgående. Dette øger, indtil videre, de samlede omkostninger ved WBG-baserede omformere. Desuden er fremstillingsprocesserne for WBG-enheder er stadig under udvikling og ved at blive optimeret, hvilket kan påvirke udbyttet og skalerbarheden. Endelig kræver det en ny tilgang og ekspertise at designe systemer, der fuldt ud udnytter fordelene ved WBG-teknologi, hvilket kan være en hindring for udbredt anvendelse.

Sammenfattende kan man sige, at selv om WBG-omformere har mange fordele, vil det være afgørende at overvinde disse udfordringer for at udnytte deres fulde potentiale i en lang række anvendelser. Det vil være afgørende for en vellykket integration af WBG-teknologien i almindelig effektelektronik at løse udfordringerne med omkostninger, fremstilling, pålidelighed, design og markedsadoption.

## 8.2 Anvendt WBG-teknologi i frekvensomformere

En frekvensomformer er generelt opbygget med tre hovedtrin. Fra venstre mod højre ses en ensretter, hvis formål er at konvertere elnettets vekselstrøm (AC-spænding) til jævnstrøm (DC-spænding). Dernæste en mellemkreds der består af selve DC-spændingen og komponenter til

udglatning og mod højre en vekselretter, der konverterer DC-spændingen tilbage til en ny AC-spænding med ny "omformet" frekvens og spænding (deraf navnet).



Figur 8.2.1 Illustration fra IEC 61800-9-2.

Traditionelt er der blevet anvendt passive dioder i ensretteren og styrede halvledere i udgangstrinnet (IGBT). Der kan ydermere være monteret filtre i begge retninger, da både ind- og udgangen af en frekvensomformerer giver anledning til støj. Det være både auditiv og elektrisk støj, samt kabelbåren som højfrekvent luftbåren støj. Denne støj kan give anledning til øgede tab i systemet.

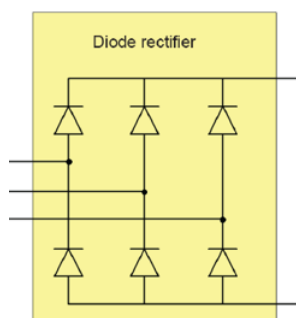
I en WBG-omformer kan halvlederne i både indgangstrinnet og udgangstrinnet være udskiftet med WBG. Det kan også forekomme at der kun er installeret WBG på udgangstrinnet.

I de følgende afsnit vil det blive beskrevet hvilke fordele det kan give at anvende WBG-teknologi fremfor standardløsningen.

### 8.2.1 WBG-teknologi på indgangstrinnet

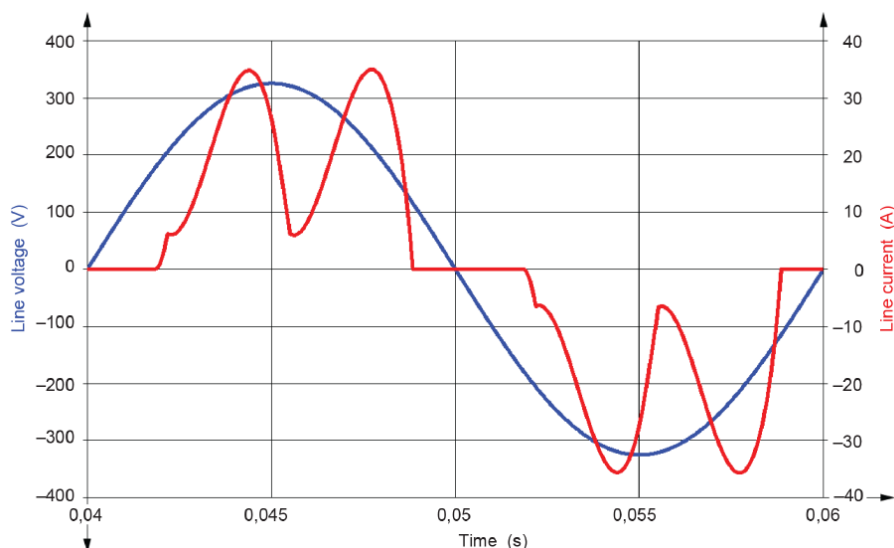
I elforsyningsnettet regnes strøm og spænding normalt for sinusformede, men på grund af generatorer, der ikke er helt ideelle, samt belastninger med ikke-sinusformede strømoftag, – det er bl.a. lysstofrør, frekvensomformere, UPS-anlæg og switch-mode strømforsyninger til PC'er, mobiltelefoner etc., så bliver såvel strøm som spænding deformeret men forbliver dog periodisk. Denne periodiske og nu ikke sinusformede strøm og spænding kan, – rent matematisk med fourier analyse, beskrives som en uendelig række af cosinus- og sinusformede strømme, hhv. spændinger med frekvenser, der er multipla af grundfrekvensen i Danmark på 50 Hz. Strømme og spændinger med højere frekvenser end 50 Hz kaldes overharmoniske eller blot harmoniske. Det er vigtigt at skelne mellem overharmoniske for spænding og for strøm.

I dette kapitel fokuseres på den forvrængede strøm på forsyningsiden til frekvensomformere.



Figur 8.2.1.1 6-puls diodeensretter (IEC 61800-9-2).

Den mest udbredte teknologi på indgangstrinnet af en frekvensomformer er en 6-puls diodeensretter. Den består af 6 passive dioder der lukker spænding og strøm ind i omformerens DC-spænding. Strømmen der trækkes fra en 6-puls diodeensretter er, til forskel fra spændingen, meget langt fra at være sinusformet, og giver derfor anledning til et stort bidrag fra de overharmoniske strømme.



Figur 8.2.1.2 Indgangsspænding og strøm på én fase ved anvendelse af en 6-puls diodeensretter.

Overharmoniske strømme kan medføre øgede tab i forsyningsnettet, i forsyningskabler og transformatorer. Det giver anledning til opvarmede kabler og sikringer og kan utilsigtet koble brydere og automatsikringer ud med stor risiko for driftstop. I installationer med mindre effekter er det eksempelvis en kendt problematik, at man ikke kan montere en frekvensomformer efter en HpFI afbryder, da denne typisk er alt for sensitiv overfor denne type belastning.

### THD

THD står for "Total Harmonic Distortion" (total harmonisk forvrængning) og er et mål for, hvor meget harmonisk forvrængning der er til stede i et signal i forhold til dets fundamentale frekvens. I elektriske systemer og lydsystemer er THD en vigtig parameter, der anvendes til at vurdere kvaliteten af et signal, hvad enten det er elektrisk strøm eller lyd.

Total harmonisk forvrængning kvantificeres ved at sammenligne størrelsen af de harmoniske komponenter af et signal med størrelsen af den fundamentale frekvens. Matematisk kan THD udtrykkes som:



$$THD = \frac{\sqrt{(I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2)}}{I_1}$$

hvor:

- $I_1$  er amplituden af strømmen med den fundamentale frekvens.
- $I_2, I_3, \dots, I_n$  er amplituderne af de harmoniske frekvenser.

### **THDi – Harmonisk indhold for strøm**

De fleste måleapparater for elektrisk effekt, det være sig "power analyzers", net-analysatorer eller lignende, kommer gerne med et bud på THD for både spænding og strøm. Acceptable niveauer for (THD) på strøm kan variere afhængigt af applikationen og de gældende standarder. Generelt er THD for strøm typisk højere end for spænding. For mange industrielle applikationer anses en THD for strøm på op til 20% som acceptabel. Dette niveau af THD er ofte håndterbart for robust industrielt udstyr, selvom lavere niveauer altid er ønskelige for at minimere varmetab og øge systemets effektivitet. I mere følsomme eller kritiske systemer, såsom hospitalsudstyr eller præcisionsfremstilling, kan der være strengere krav til THD. Her ville et niveau på under 10% ofte være mere passende for at undgå risikoen for forstyrrelser og potentielle skader på udstyr. Tommelfingerregler for THDi kunne være:

- Under 10%, normal situation, ingen særlig udbredt risiko for problemer
- 10 – 30%, signifikant harmonisk tilbagevirkning, opvarmning af kabler og transformere
- Højere end 30 % – stor harmonisk tilbagevirkning med risiko for at underdimensionerede nettransformatorer og kabler brænder af.

Næste udfordring er, at den harmonisk forvrængede strøm forårsager en harmonisk forvrænget spænding og dermed en forværrelse af spændingskvaliteten.

### **Spændingskvalitet**

Spændingskvalitet refererer til de elektriske parametre, der beskriver egenskaberne ved en vekselspænding, som forsyner eksempelvis motorer. Det omfatter aspekter som spændingsniveau, stabilitet, frekvens, asymmetri, harmonisk forvrængning, transienter og flikker.

Spændingskvalitet er vigtigt at se på, fordi det påvirker stabiliteten og effektiviteten af de tilsluttede forbrugere udover sikkerheden og levetiden. Hvis forbrugeren en elektrisk motor kan en dårlig spændingskvalitet reducere levetiden på motoren og til sidst ødelægge den. Det kunne f.eks. være asymmetrisk spænding. Elmotorer kan ikke holde til flere på hinanden følgende spændingsudfald. Det vil medføre fejl og driftsstop, - ofte med store økonomiske konsekvenser til følge.

Som med strøm kan man også vurdere indholdet af harmoniske på spændingen ved en THD-analyse. For spænding refereres denne til som THDu.

### **THDu – Harmonisk indhold for spænding**

Acceptable niveauer for THD på spænding er typisk lavere end for strøm, da spændingskvaliteten har en direkte indvirkning på alle de tilsluttede elektriske enheder. Her er nogle generelle retningslinjer for acceptable niveauer af THD på spænding.

Lavspændingssystemer (under 1 kV):

- For de fleste lavspændingssystemer anses en THD for spænding på op til 5% som acceptabel. Dette niveau er typisk tilstrækkeligt for at sikre, at der ikke opstår betydelige problemer med elektrisk udstyr eller systemeffektivitet.

Mellem- og Højspændingssystemer:

- For mellem- og højspændingssystemer er kravene ofte strengere. Her tilstræber man typisk en THD på under 3% for at minimere risikoen for harmonisk forvrængning, som kan påvirke systemstabilitet og udstyrssikkerhed.

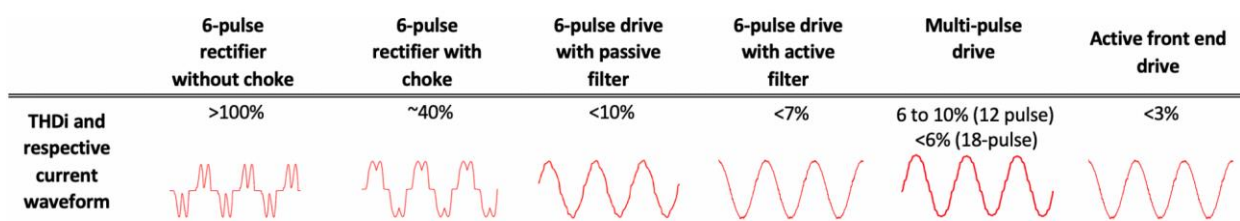
Lav THD sikrer en høj effektkvalitet, hvilket er vigtigt for at beskytte følsomt elektronisk udstyr mod skader og for at sikre optimal ydeevne. Hvis THD er høj kan det skabe problemer med systemstabiliteten, såsom resonans og overophedning, hvilket kan føre til driftsafbrydelser og skader på udstyr. Ved at opretholde lav en THD kan man forhindre unødvendig belastning og reducere slid på elektriske komponenter, hvilket kan forlænge deres levetid og reducere vedligeholdelsesomkostningerne.

### Varianter af indgangstrin

De overharmoniske strømme kan reduceres eller stort set fjernes ved brug af forskellige metoder, herunder passive og aktive filtre. Aktive filtre tilpasser sig de varierende belastningsforhold uden tidsforsinkelse. De overharmoniske strømme kan endvidere reduceres yderligere ved at anvende særlige "Low Harmonic" drev eller omformere med aktiv indgang (AFE).

Herunder ses en illustration der giver et bud på THDi ved anvendelse af forskellige typer 3-faset indgangsbro på frekvensomformere.

Harmonic content at nominal load with different solutions



Figur 8.2.1.3 Indgangsstrøm på én fase udtrykt ved forskellige typer ensretter (ABB Whitepaper 2021).

Worst case er en standard 6-puls ensretter som illustreret på figur 8.2.1.3 (6-pulse rectifier without choke). Denne giver anledning til en THDi på langt over 100% og vil typisk kun være tilladt i installationer, hvor frekvensomformeren er forsynet af sin egen transformator.

Næste i rækken er tilfældet hvor indgangen bliver forsynet med et passivt induktivt filter også kendt som en "AC-Choke". Det er også denne type man oftest vil møde "ude i virkeligheden" i dansk industri. Det er sparsomt hvad der findes af information om målinger af THDi og THDu i danske fremstillingsvirksomheder.

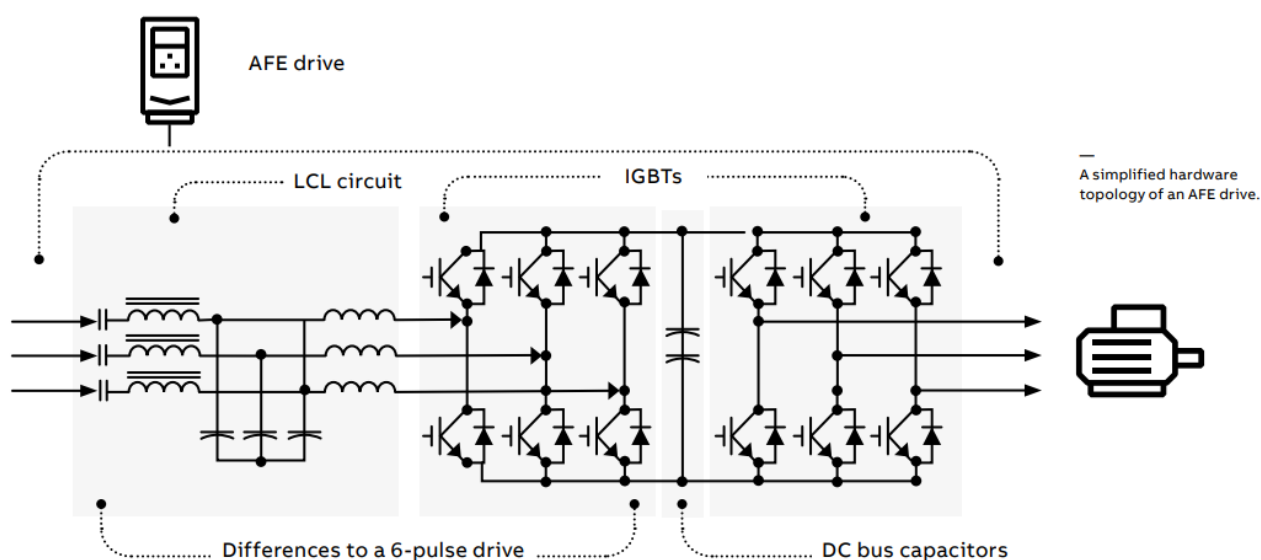
I rapporten "Forundersøgelse af muligheder for energibesparelser i erhvervslivet ved reduktion af overharmoniske strømme" udarbejdet af Dansk Energi Analyse for 15 år siden, altså i 2009, ses målinger af THDi og THDu på eltavler, hvor der både var tilsluttet direkte koblede elmotorer (D.O.L.) og eltavler hvor der var tilsluttet frekvensomformere der drev motorer. Desuden er der

målinger på eltavler med en kombination af direkte koblede motorer og motorer via frekvensomformere.

I eltavlerne med motorer forsynet af omformere blev der målt THDi-værdier på 40–45%, hvilket indikerer standardomformere med AC-chokes.

I eltavlerne hvor 80–90% bestod af direkte forsynede elmotorer blev der målt THDi-værdier på et sted mellem 5 & 10%.

Går man i den helt anden retning og søger lavest mulig THDi på forsynings siden, skal man kigge på "Low Harmonic Drives" (LHD) eller drives med "Active Front End" (AFE). De giver begge anledning til en meget begrænset THDi på indgangssiden, da udformningen på strømmene går mod at være sinusformede.



Figur 8.2.1.4 Active Front End (AFE) i kombination med LCL filter (ABB Whitepaper 2021).

Set udefra er forskellen på LHD og AFE ensrettere, at sidstnævnte er i stand til at føre energi tilbage på nettet. Denne løsning er særdeles formålstjenlig i applikationer, der har behov for at nedbremse større inertier og lignende. Dette kunne være elevatorer, kraner og hejseværker, rullebånd og ikke mindst vindmøller. Alle disse applikationer drager fordel af at kunne føre energi retur til nettet, da de kan genvinde energien under bremseprocessen og dermed overordnet set forbedrer effektiviteten og reducere energiforbruget for applikationen.

På illustrationen herover er alle halvlederne udført med IGBT-enheder. De kunne i princippet lige såvel være udført som WBG-enheder. Hvis det havde været tilfældet ville tabene i både ens- og vekselretter isoleret set være blevet reduceret. Hvor meget, og med hvilke fordele og ulemper det måtte medføre følger senere.

Det optimale på forsynings siden er at trække den pæneste mulige strøm (ren sinus) med en power faktor der er så tæt på 1 som mulig, så al den førte strøm bliver udnyttet til reelt arbejde. Den elektromekaniske opbygning af en halvleder ensretterbro gør, at sinusformen ikke påvirkes. Der skal således udelukkende fokuseres på at skabe en så pæn som mulig indgangsstrøm, altså en strøm med lavest mulig THDi på forsynings siden for at begrænse tab i transformere og kabler.

**Yderligere effekttab i transformere grundet harmoniske strømme**

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

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

hvor:

$R_f$  er transformerens resistans pr. vikling eller fase

$I$  er amplituden af den harmoniske strøm

Transformere stresses meget af overharmoniske strømme, idet kræfterne, der påvirker viklinger, strømførende beslag og tilslutninger, er proportionale med strømmens amplitude.

Indeholder spændingen ligeledes harmoniske med væsentlige amplituder, kan transformerjernet gå i mætning, og dermed kan amplitudeværdien af magnetiseringsstrømmen blive så stor, at transformeren må de-klassificeres.

**Yderligere effekttab i elnettet (ledere/kabler) grundet harmoniske strømme**

Ved kabelanlæg er tabseffekten på grund af de harmoniske som ved transformerne:

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

hvor:

$R_f$  er elkablets resistans pr. leder eller fase

$I$  er amplituden af den harmoniske strøm

I udtrykket ses, at effekttabet afhænger af resistansen/modstanden i de enkelte faser og de enkelte overharmoniske strømmes kvadrerede amplituder. I begge tilfælde ses en forbløffende lighed med elementerne der indgår i udregningen af THDi.

**Et bud på tab forårsaget af harmoniske på forsyningsiden**

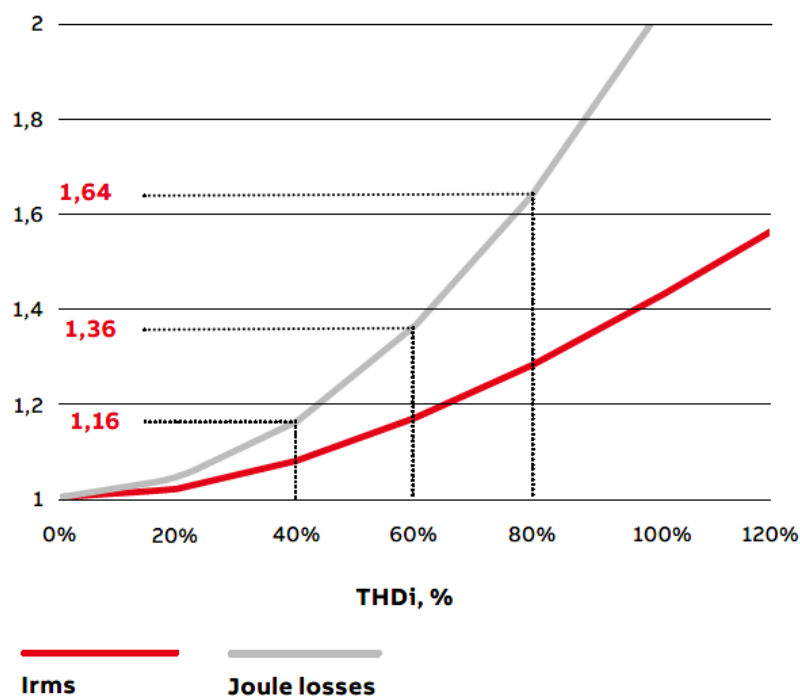
Det er ikke helt simpelt at udtale sig om hvor meget ekstra tab der bliver introduceret som funktion af overharmoniske. Typer af kabler med forskellige impedanser vil influere det endelige tab ligesom fysiske faktorer så som temperatur og lignende også påvirker kabeltabet.

ABB har udgivet et "Whitepaper" i 2021 med et bud på sammenhængen mellem tab og THDi. Her ses det at en almindelig omformer med 6-puls ensretter og AC-Choke, som har en THDi på ca. 40%, vil have et tab (i joule) der er forøget med 16%, se figur 7.2.1.4.

Tilsvarende fremgår det, at THDi på op mod 100% svarer til en fordobling af kabeltabet. De nævnte tab kan kun benyttes som indikation, da den endelige beregning er langt mere kompliceret. Men det vurderes at, de nævnte værdier kan anvendes som tommelfingerregel, og at det er det en god start til at få en fornemmelse af vigtigheden af at begrænse THDi i forsyningskæden.

Som en lille fodnote bør det nævnes at alle små 1-fasede switch-mode strømforsyninger også trækker meget ikke sinusformede strømme (mobilladere, PC'er, TV etc.)

Switch-mode strømforsyninger er populære, fordi de kan håndtere en bred vifte af inputspændinger, levere stabil udgangsspænding, og minimere energitab ved at operere med høj effektivitet. Dette gør dem ideelle til både forbrugerelektronik og industrielle applikationer, men det stiller samtidigt krav til forsyningsselskaberne i forhold til at kunne levere den nødvendige energi uden unødige tab.



Figur 8.2.1.5 Forøgede tab på forsyningssiden som funktion af THDi (ABB Whitepaper 2021).

### Tab på forsyningssiden på maskinsystemer

Ifølge rapporten: "Electric Motors and variable speed drives. Ecodesign requirements apply to these products" er i gennemsnit ca. 40% af de installerede motorer i industrien udstyret med frekvensomformer. Med udgangspunkt i dette tal samt i en kortlægning af erhvervslivets energiforbrug<sup>2</sup>, er der foretaget et estimat af udbredelsen af frekvensomformere i dansk industri, se tabel 8.2.1.1, samt potentialerne for øget anvendelse af frekvensomformere.

<sup>2</sup> Kortlægning af energiforbrug og opgørelse af energi- sparepotentialer i produktionserhvervene, Energistyrelsen 2022

Årligt forbrug [GWh]	Eksisterende inkl. VSD	Potentiale for at installere VSD	D.O.L drift	Total
Ventilation	50% - 868	35% - 608	15% - 260	1.736
Pumper	50% - 478	35% - 335	15% - 143	956
Trykluft	40% - 312	25% - 195	35% - 195	781
Køling	40% - 357	25% - 223	35% - 223	892
Hydraulik	20% - 43	50% - 107	30% - 64	214
Anden drift	40% - 890	25% - 556	35% - 778	2.224
I alt	2.948	2.023	1.832	6.803

Tablet 8.2.1.1 Potentialer for øget anvendelse af frekvensomformere i dansk industri.

Det vurderes, at ca. 95 % af de installerede frekvensomformere i danske fremstillingsvirksomheder er de helt almindelige 6-puls omformere med THDi-værdier på ca. 40%.

Energitalbet (strømvarmetabet) i forsyningen til omformerne er, som det ses af figur 8.2.1.5, måske forøget med helt op til 16%. Det vil sige, at det nuværende forøgede energital på den installerede base udgør op mod ca. 9 GWh og at der er yderligere op til ca. 6 GWh, hvis der fortsat udelukkende anvendes den konventionelle 6-puls teknologi.

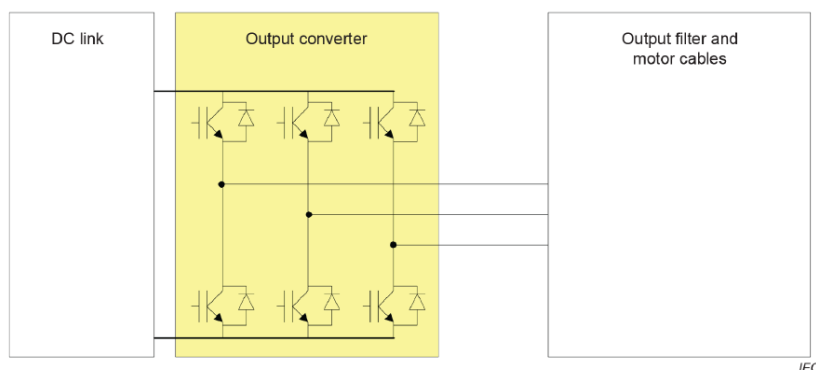
Udover energitalbet i forsyningen er der tab i transformerne. Effekten af harmoniske strømme ved harmoniske frekvenser forårsager stigning i kernetab pga. øget jernstab (hvirvelstrømme og hysteres) i transformatorerne. Desuden vil der være øget kobbertab og omstrefjende fluxstab, der resulterer i yderligere opvarmning af transformatoren.

Når en ikke-lineær belastning (som en motor med VSD) forsynes fra en transformer, er det sommetider nødvendigt at reducere transformatorens nominelle kapacitet for at undgå overophedning og fejl som følge heraf.

Tabene i transformere vurderes at udgøre 3–5%, men kan i nogle tilfælde være betydeligt højere. Transformertabene skønnes at udgøre 200–300 GWh.

### 8.2.2 WBG-teknologi på udgangstrinnet

Udgangstrinnet på en frekvensomformer, vekselretteren, har historisk set altid i langt de fleste tilfælde bestået af styrede halvledere (Insulated Gate Bipolar Transistors - IGBT) opbygget af silicium (Si). Det elektriske diagram ses herunder, hvor vekselretteren er markeret med gult.



Figur 8.2.2.1 Standard udgangstrin, IGBT (IEC 61800-9-2).

Med udgangspunkt i DC-mellemkredsen, der typisk har et niveau på 560-580 VDC, genereres der AC-spænding ved henholdsvis at tænde for "plus" & "minus" siden på den enkelte fase i et særligt mønster, hvor man varierer bredden for de to pulser for henholdsvis tændt og slukket. Denne metode kaldes pulsbredde-modulation, eller på engelsk: "Pulse Width Modulation" – (PWM), og med denne metode kan man således selv bestemme både frekvens og spænding på udgangen af omformeren.

En 3-faset elmotor, der drives af en PWM-omformer, oplever en spændingsforsyning, der er ret forskellig fra den rene sinusformede vekselstrøm, som den normalt ville få fra forsyningen. Selvom den umiddelbare spænding er en række pulser, er det grundtonen af spændingen, der bestemmer motorens opførsel. PWM-omformerer justerer pulsbredden for at kontrollere grundtonespændingen og dermed motorens hastighed og moment.

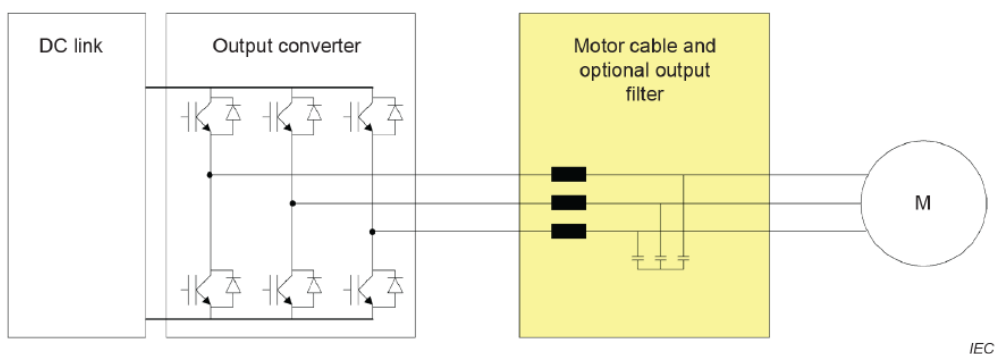
PWM-signaler genereres med højere frekvenser end net-frekvensen (typisk fra 2 til 8 kHz). Denne skitrefrekvens betegnes oftest som switch-frekvensen.

Motorens induktans virker som et lavpas-filter, hvilket betyder, at de høje frekvenser i PWM-signalet bliver filtreret ud, og motoren oplever en jævnere strøm og spænding, der er tættere på en sinusformet kurve. Dette kan dog stærkt forbedres ved brug af deciderede filtre, men det er i sagens natur ikke tabsfrit, da filtre har tab som alt andet.

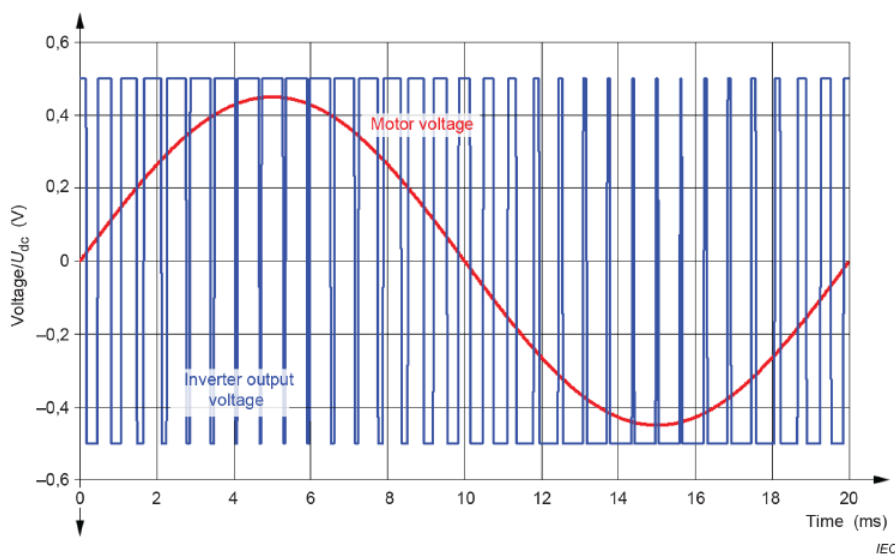
Med ændringerne i PWM-signalet kan omformerer styre motorens hastighed og moment præcist.

Sammenfattende betyder dette, at selvom en 3-faset elmotor modtager en "hakket" spænding fra en PWM-omformer, oplever den i praksis en mere glat strøm på grund af dens induktive egenskaber. Dette gør det muligt for omformerer at kontrollere motorens ydeevne meget præcist. Det er ikke alle elmotorer der kan tåle at blive forsynet fra en frekvensomformer. De høje switch-frekvenser og stigetiden på forskellene i voltniveauerne ( $dU/dt$ ) stiller skærpede krav til isoleringen på elmotoren.

Én løsning på den problematik kan være at introducere filtre på udgangen af frekvensomformerer. Et filter introducerer som nævnt forøgede tab, men til gengæld vil motoren opleve en glattere spænding som i visse tilfælde muliggør anvendelse af eksisterende ældre motorer.



Figur 8.2.2.2 Standard udgangstrin inklusive udgangsfilter, IGBT (IEC 61800-9-2).



Figur 8.2.2.3 Kurveform på et standard udgangstrin inklusive udgangsfilter, IGBT (IEC 61800-9-2).

Den forbedrede virkningsgrad der opnås ved at anvende WBG teknologi i udgangstrinnet frem for standard silicium IGBT-moduler, kan f.eks. udnyttes til at introducere udgangsfiltere, hvorved den samlede løsning har stort set uændret samlet virkningsgrad, men spænding med ren sinus-kurve ud af frekvensomformeren. Herved fjernes diverse "dårligheder" i motorer der kan komme fra at blive styret af en frekvensomformer, og eksisterende motorer får dermed potentielt forlænget deres levetid betragteligt, og det bliver muligt at anvendes ældre typer motorer der ellers ikke ville kunne forsynes fra en frekvensomformer.

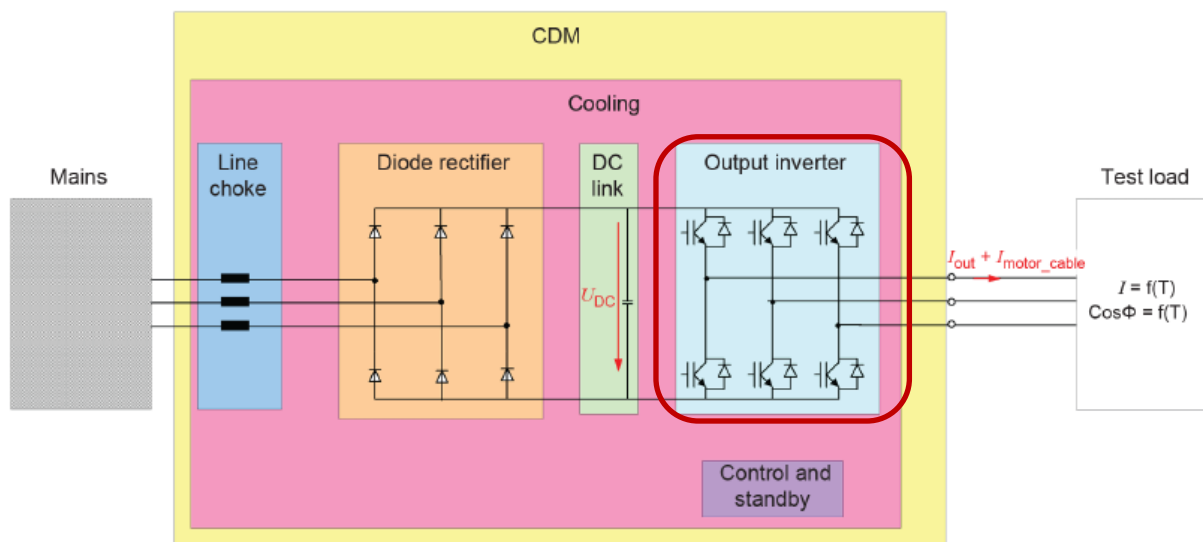
### 8.2.3 Målinger på en WBG-frekvensomformer

WBG-teknologien er stadig i sine tidlige dage for såvidt angår kommercielt tilgængelige frekvensomformere. I dette projekt var det ønskeligt at gennemføre en række praktiske målinger på WBG-teknologi med det in mente, hvad der var praktisk muligt.

Det bedst mulige scenarie det lykkedes at lave målinger på, var en række sammenlignelige målinger på et 7,5 kW motorsystem med to forskellige frekvensomformere, - én traditionel frekvensomformer og én med WPG teknologi.

Den traditionelle frekvensomformer (A – Si) var en Danfoss Drives standardomformer, og den anden var en fuldstændig tilsvarende omformer, hvor udgangstrinnet var udskiftet (det lyseblå herunder "Output inverter") med et tilsvarende modul baseret på WBG teknologi (B – SiC).



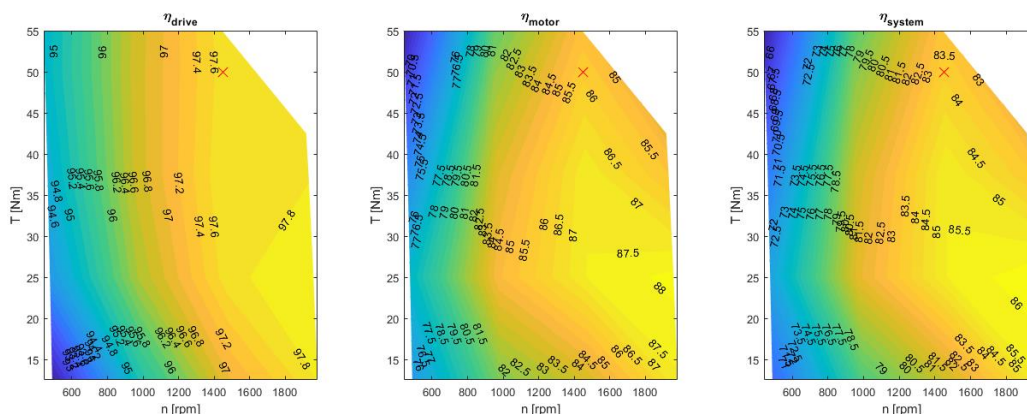


Figur 8.2.3.1 Illustration fra IEC 61800-9-2.

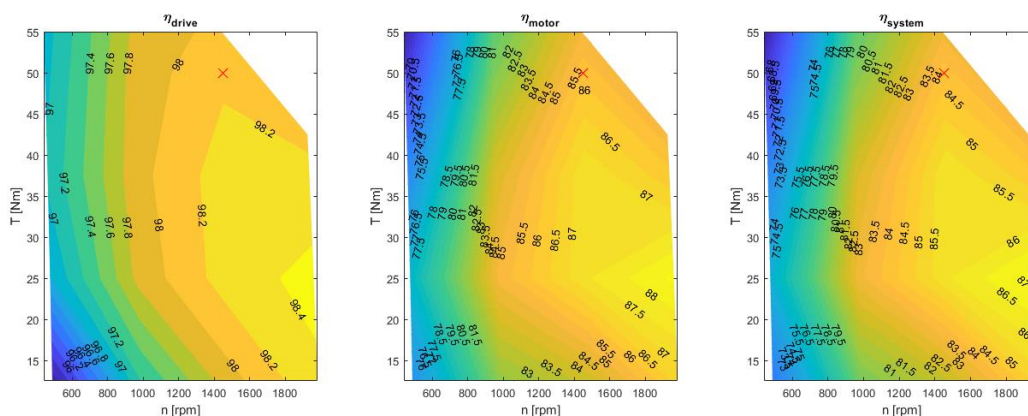
Målingerne, der blev foretaget på de to systemer, var sammenlignelige med målingerne foretaget på den eksisterende teknologi nævnt tidligere i rapporten. Der er genereret konturplot af virkningsgraden med hastigheder på op til 140% og belastninger op mod 120%. Herunder ses målingerne (A + B) udtrykt i konturplot for både omformer, motor og det samlede system.

Konklusionen er, at omformeren med WBG-teknologi (B – SiC) isoleret set har bedre virkningsgrad allerede ved nominel last, ca. 0,5% point. I takt med at både belastningen og især hastigheden reduceres stiger den forbedrede virkningsgrad på omformeren med WBG-udgangstrin. Ved 25% last og en 1/3 hastighed er virkningsgraden 3% point bedre eller mere.

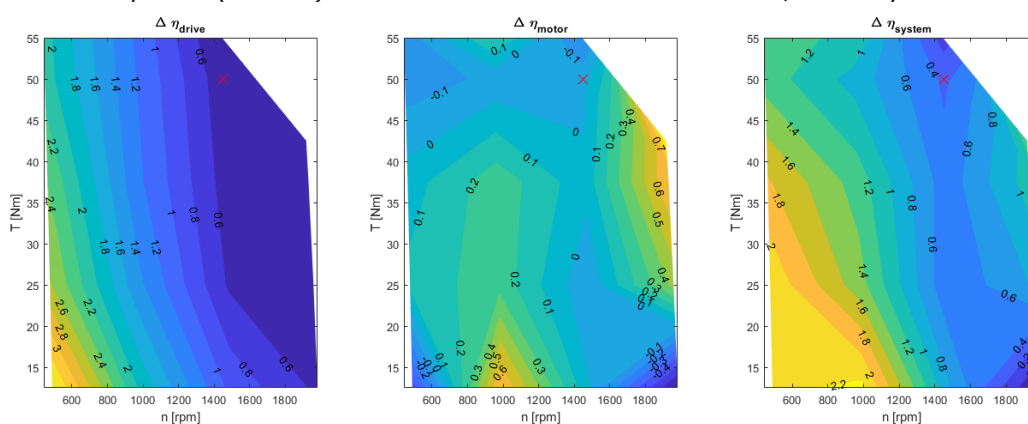
Motoren, som var den samme ved begge test, udviste ingen nævneværdig forskel på virkningsgraden i det normale driftsområde uanset hvilken af de to omformere den blev forsynet fra. Tendentielt var motorvirkningsgraden ca. 1 % point højere ved højt omløbstal, hvor det typisk er jerntab der dominerer, og i dette tilfælde kan jerntabene tænkes at være reduceret på grund af det lavere harmoniske indhold i strømmen.



Figur 8.2.3.2 Konturplot af (A – Si) omformeren som driver en 7.5 kW asynkronmotor.



Figur 8.2.3.3 Konturplot af (B – SiC) omformeren der driver den samme 7,5 kW asynkronmotor.

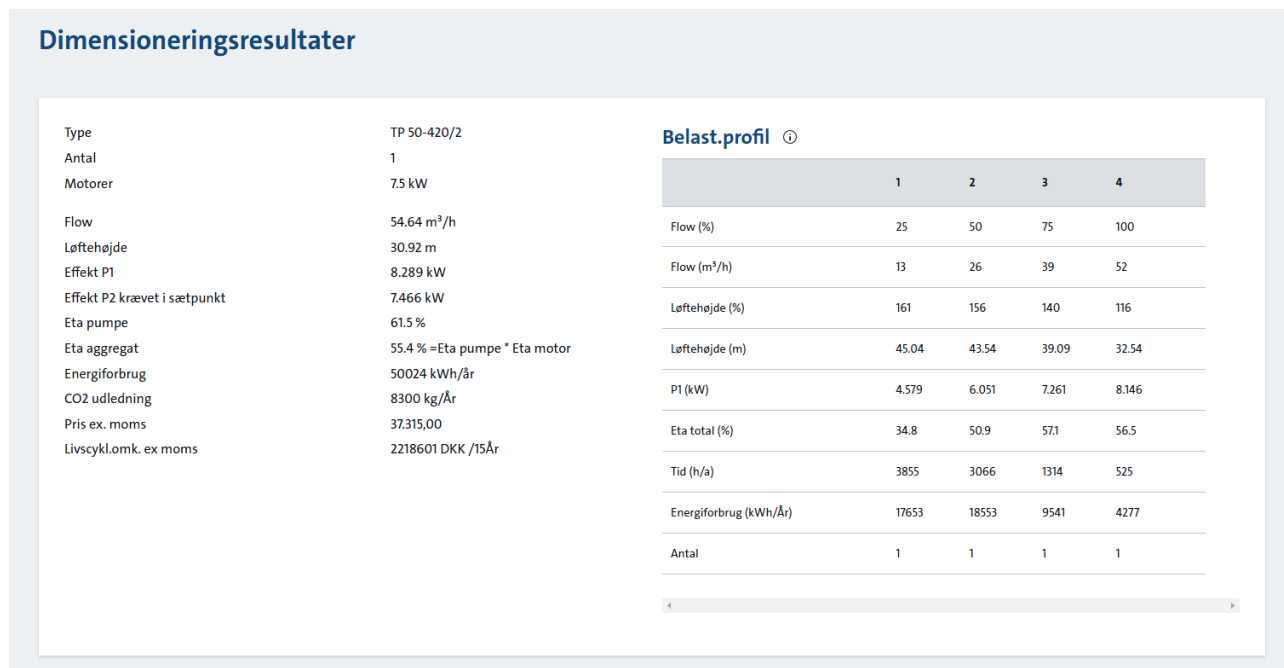


Figur 8.2.3.4 Konturplot af differencen mellem virkningsgrader på de to systemer.

### Gennemregnet eksempel med en pumpeinstallation

Hvis man forestiller sig at netop ovenstående motorsystem var etableret i forbindelse med et pumpesystem, er det muligt at komme med et bud på den praktiske besparelse ved anvendelse af frekvensomformere med WBG udgangstrin.

Til det formål anvender vi den gængse belastningsprofil til varmeanlæg kendt som "blaue engel" profilen. Den siger, at fuld last (fuldt flow) kun forekommer i 6% af tiden, 15% af tiden driftes med 75% belastning, 35% af tiden driftes med 50% belastning og at der i 44% af tiden driftes med 25% belastning (flow). En stor dansk pumpeproducent har et online beregningsværktøj, hvor der regnes ud fra netop denne profil og kommer med bud på pumpevirkningsgraden m.m. i de fire dellastpunkter.



Figur 8.2.3.5 Gennemregnet pumpeeksempel.

Hvis vi tager udgangspunkt i denne beregning og ganger virkningsgraden for de to testede systemer på viser beregningen, at der ligger en besparelse på knap 1.000 kWh alene ved at anvende et WBG modul fremfor et konventionelt på udgangstrinnet.

- (A – Si), Samlet energioptag: 52.517 kWh/år
- (B – SiC), Samlet energioptag: 51.577 kWh/år
- Differens: 940 kWh/år

Dette er et meget forsimplet regnestykke og i virkeligheden ville der indgå flere faktorer, der vil influere på systemvirkningsgraden. Det være installerede kabellængder, ændret switch-frekvens på omformeren samt eventuelle installerede filtre med mere.

Ovenstående beregning med udgangspunkt i den anerkendte lastprofil "blauë ängel" vurderes at være repræsentativ for potentialet ved at anvende WPG teknologi i udgangstrinnet på frekvensomformere fremfor den nuværende teknologi.

### 8.2.4 Konklusioner ift. virkningsgrader og perspektiver på WBG

Der er ingen tvivl om at der kan opnås en lang række fordele og forbedringer ved at anvende WBG-teknologi frem for konventionel teknologi, - også i industrielle frekvensomformere.

I dette projekt har det været målet at bruge WBG som "anvendt elektronik", altså implementere det ude i virkeligheden og se og måle på dynamikker, effekter og andre fordele (eller ulemper), som brug af WBG-teknologi i industrielle frekvensomformere fører med sig.

Det har desværre vist sig, ikke at være muligt at få implementeret WBG-teknologi andre steder end i laboratoriet i løbet af dette projekt. Målingerne her har dog, dette til trods, påvist at der er et hidtil uudnyttet potentiale i at anvende WBG-teknologi i helt almindelige installationer med industrielle frekvensomformere, eksempelvis i et 7.5 kW pumpesystem som beskrevet tidligere.

Ligeledes er problematikkerne omkring indgangstrinnet på en konventionel frekvensomformer belyst. Det er vist hvorfor en given THDi influerer på tabet på forsyningsiden og det er demonstreret, hvordan forskellige løsninger giver muligheder for forskellige forbedringer. Med den demonstrerede forbedrede virkningsgrad på SiC enheder sammenholdt med Si enheder kan man således nemt forestille sig at WBG-komponenter på indgangen også vil give øget effektivitet.

Det er dog ikke komplette sandhed, for som så ofte før skal der vælges den rette løsning til den rette opgave, og her spiller pris og behov naturligvis ind. Der er, indtil videre, en forøget omkostning forbundet med en WBG-løsning, men med den naturlige produktmodning af disse komponenter vurderes det, at det vil føre til en overkommelig prisforskel i en ikke så fjern fremtid.

Hvis situationen er, at "money is no object", så har dette projekt vist, at de forbedrede virkningsgrader på WBG-komponenter nogenlunde kan kompensere de øgede tab eventuelle filtre giver anledning til. Så i fremtiden kunne være en frekvensomformer med fuld WBG på ind- og udgang, fuld filtrering på ind- og udgang og mulighed for tilbageførsel af energi (AFE) med en samlet virkningsgrad der fuldt ud matcher, og måske endda forbedrer, en nuværende konventionel løsning.

WBG-løsningen vil trække en ren sinusformet strøm på indgangen med minimerede tab i transformator og kabler til følge, og den ville ligeledes aflevere en ren sinusformet strøm og spænding til den forbundne motor, som af samme årsag i sig selv vil have højere virkningsgrad grundet den rene sinus og ydermere være langt mindre "følsom" overfor støj og lignende. Dette åbner rigt op for mulighederne for at anvende frekvensomformere på ældre motorer (retrofit), der ikke har en intern isolering af viklingerne der kan tåle frekvensomformerdrift. Samtidig minimeres problematikken omkring uønskede leje strømme, der ofte ses ved frekvensomformerdrift.

## 9 Udvikling af applikationstilpasset software

Som nævnt i kapitel 6.1.3 "Automatisk Energi Optimering (AEO)" er der i nyere frekvensomformere typisk indbygget Automatisk Energi Optimering (AEO), hvor frekvensomformeren beregner det optimale forhold mellem motorspændingen og frekvensen i det enkelte arbejds punkt. Dette sikrer, at motor og frekvensomformer kører med den højest opnåelige virkningsgrad uanset belastningen.

I Figur 9.1 ses virkningsgraden for en frekvensomformer som funktion af belastningsgraden. Belastningsgraden for frekvensomformeren defineres således:

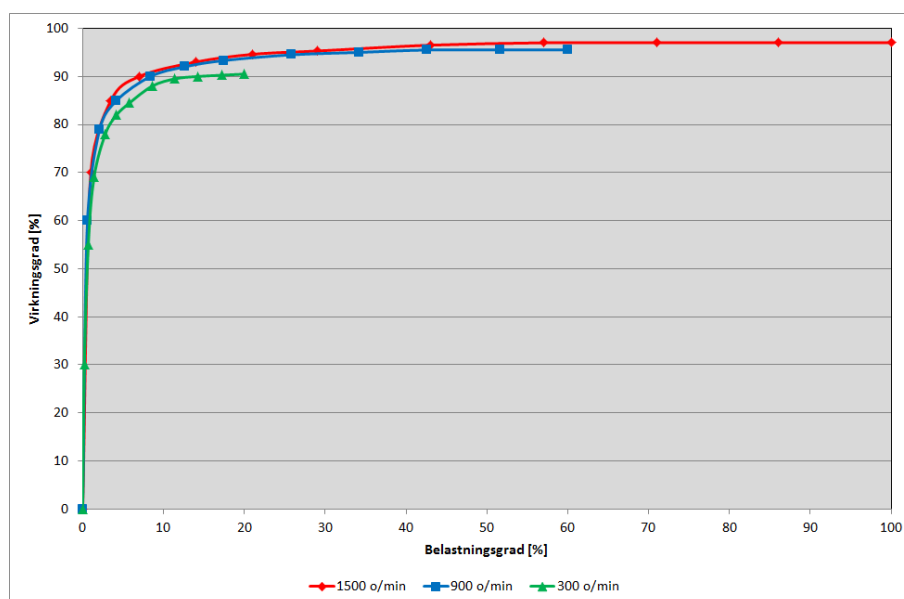
$$\text{Belastningsgrad} = \frac{P_f}{P_{f,N}}$$

hvor:

$P_f$  er den aktuelle afgivne effekt til motoren [kW]

$P_{f,N}$  er den nominelle afgivne effekt til motoren (ved nominelt omløbstal)[kW]

En frekvensomformer er, som nævnt i kapitel 5.1 "Frekvensomformerdrift", i stand til at variere spændingen og frekvens til motoren, således at motoren kan yde det nominelle moment ved forskellige omløbstal. Derfor ses det i Figur 9.1, at den maksimale belastningsgrad falder proportionalt med reduktionen i omløbstallet.



Figur 9.1 Virkningsgrad for frekvensomformer som funktion af belastningsgraden.

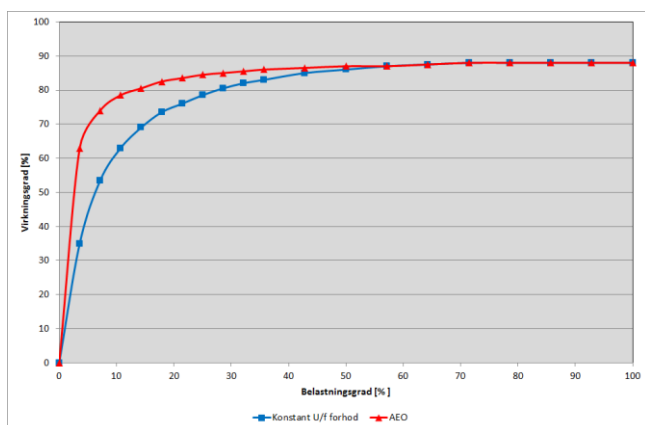
Som det ses, afhænger virkningsgraden både af belastningsgraden og motorens omløbstal. Det ses, at virkningsgraden for frekvensomformeren falder når omløbstallet reduceres (og motorens moment holdes konstant). Som det ses, reduceres virkningsgraden af frekvensomformeren betydeligt, når omløbstallet reduceres til 300 o/min.

Ved nominelt omløbstal (1.500 o/min) ses det, at virkningsgraden stort set er konstant ved belastningsgrader mellem 40-100%. Ved belastningsgrader lavere end 40% sker der fald i virkningsgraden. Belastningsgraden skal dog under 20%, før virkningsgraden for alvor begynder at falde. Og ved 900 o/min ses det, at virkningsgraden stort set er konstant ved belastningsgrader mellem 25-60%. Belastningsgraden skal under 15 % før virkningsgraden for alvor begynder at falde. Endelig ses det, at ved 300 o/min er virkningsgraden stort set er konstant ved belastningsgrader mellem 10-20%. Når belastningsgraden kommer under 10% sker der et betydeligt fald i virkningsgraden.

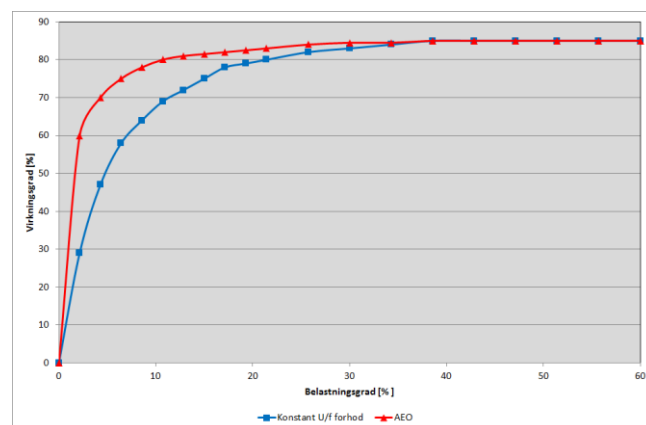
I figurerne 9.2 til 9.4 ses virkningsgrader for motor og frekvensomformer (samlet set) som funktion af belastningsgraden. Virkningsgradskurverne er vist for tre omløbstal (1.500, 900 og 300 o/min) og for styrestrategierne konstant spændings-frekvensforhold og Automatisk Energi Optimering.

På figurerne ses, at en reduktion af omdrejningstallet fra 1.500 o/min til 900 o/min giver anledning til en relativ lille reduktion af virkningsgraden for det samlede drev (motor og frekvensomformer) ved belastningsgrader mellem 0-60% for begge styrestrategier.

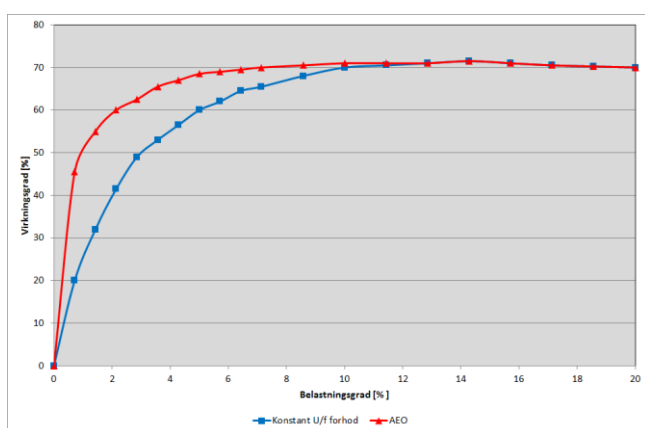
Reduceres omdrejningstallet til 300 o/min, giver det anledning til en betydelig reduktion af virkningsgraden ved belastningsgrader mellem 0-20% for begge styrestrategier.



Figur 9.2 Virkningsgrader for motor og frekvensomformer som funktion af belastningsgraden ved 1.500 o/min..



Figur 9.3 Virkningsgrader for motor og frekvensomformer som funktion af belastningsgraden ved 900 o/min..



Figur 9.4 Virkningsgrader for motor og frekvensomformer som funktion af belastningsgraden ved 300 o/min..

På figurene ses endvidere, at hvis belastningsgraden kommer under halvdelen af den maksimale, kan der opnås en fordel ved at anvende en styrestrategi med Automatisk Energi Optimering.

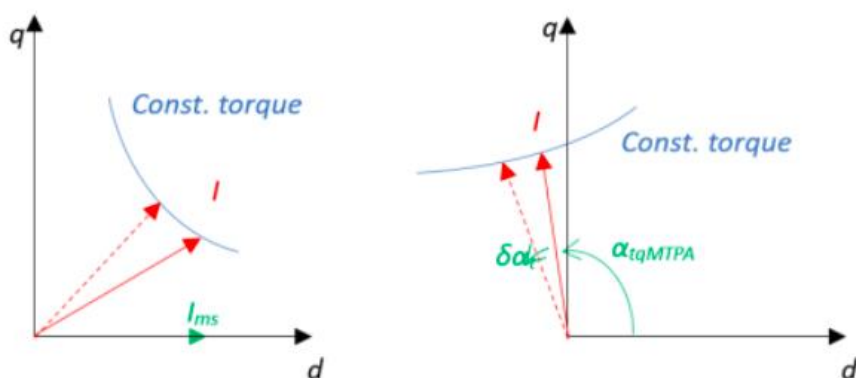
Dette gælder både når motoren kører med konstant omløbstal og varierende belastningsgrad samt når den kører med variabelt omløbstal og varierende belastningsgrad.

Det sidstnævnte gælder f.eks. for ventilatorer og pumper, hvor belastningen (momentbehovet) falder kvadratisk med omløbstallet. For ventilatorer og pumper vil en stor reduktion af omløbstallet derfor medføre en endnu større reduktion af belastningen, hvorfor der kan opnås en betydelig forbedring af virkningsgraden for motor og frekvensomformer ved at anvende en styrestrategi med Automatisk Energi Optimering.

Undersøgelser i motorlaboratoriet hos Danfoss har vist, at der kan opnås yderligere besparelser, end dem der kan opnås ved at benytte ved at benytte Automatisk Energi Optimering.

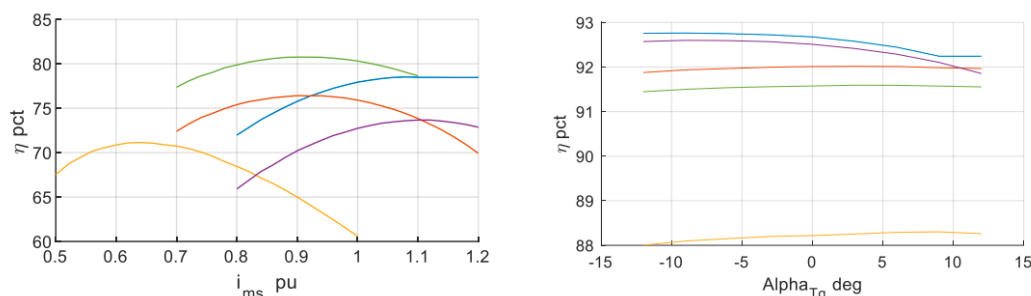
AEO-funktionen der er tilgængelig i drev/frekvensomformere pt. er deterministisk og kræver derfor detaljeret kendskab til motorparametrene. Danfoss er derfor ved at udvikle en feature/funktion, som automatisk søger maksimal virkningsgrad for et givet arbejds punkt ved at justere magnetiseringsstrømmen (for asynkronmaskiner) eller momentvinklen (for synkronmaskiner), uanset hvilke motorparametre drevet er konfigureret med, se figur 8.5.

Figur 9.5 viser variationen af elektromagnetisk driftspunkt for asynkronmotor (venstre) og PM-motor (højre) ved online parameterjustering (grøn). Motorens akseffekt er konstant.



Figur 9.5 Variationen af elektromagnetisk driftspunkt.

Figur 9.6 viser to konkrete eksempler på, hvordan det optimale driftspunkt for hvert belastningspunkt blev fundet ved et væld af specifikke VSD-parametre som angivet i figur 9.5.



Figur 9.6 Optimale driftspunkter.

I de to konkrete måleeksempler er magnetiseringsstrømmen (for asynkronmaskiner) eller momentvinklen (for synkronmaskiner) justeret for at opnå maksimal virkningsgrad. Denne justering er foretaget manuelt, men Danfoss er nu ved at teste en feature hvor det sker automatisk.

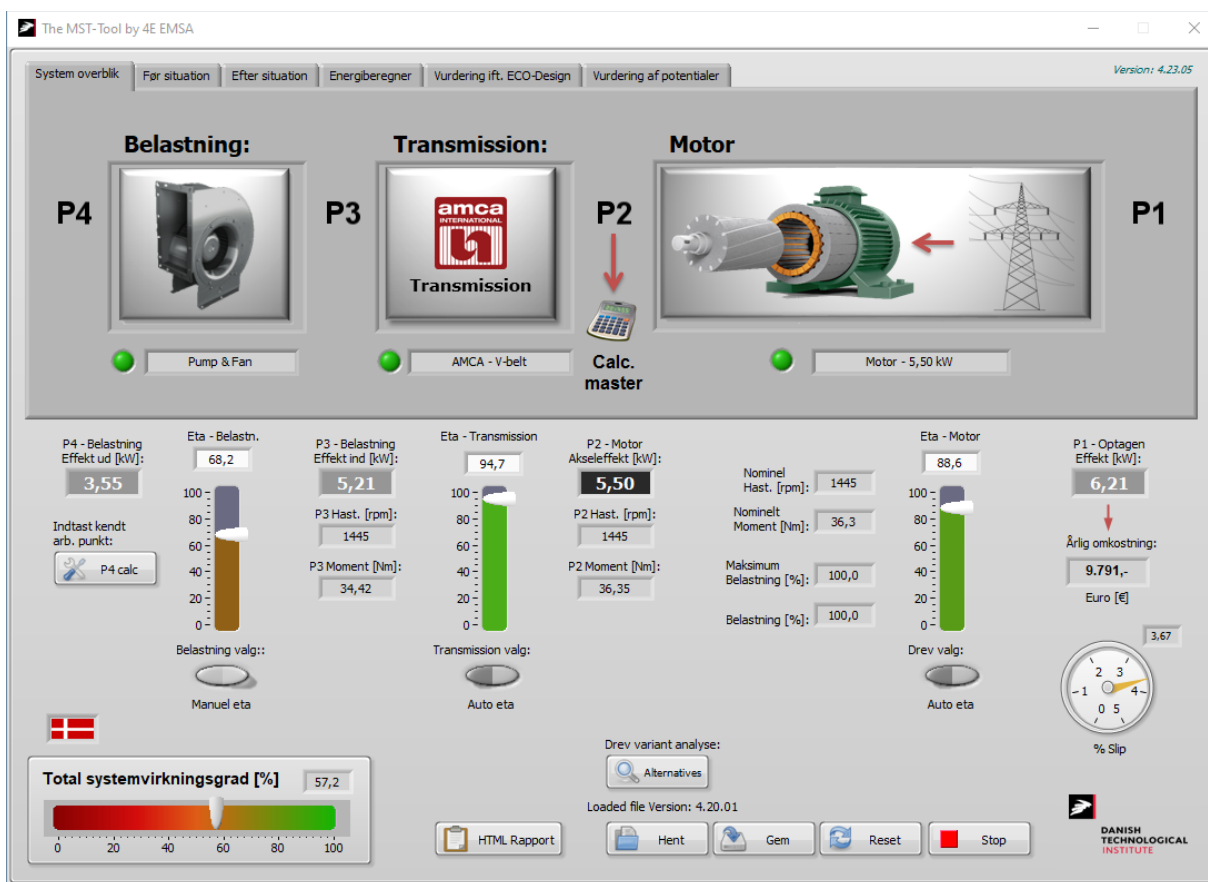
Den venstre kurve er for en asynkronmotor, hvor magnetiseringsstrømmen varieres, og standardværdien er 1 pr. enhed. Den højre kurve er for en synkronmotor, hvor drejningsmomentvinkelforskydningen varieres, og standard er 0 grader. Det bemærkes, hvordan variationen i virkningsgraden er større for asynkronmotoren. For hver motortype opnås effektivitetsforøgelsen i hvert driftspunkt som forskellen mellem effektiviteten ved det optimale og defaultværdien af tuningsparameteren. Algoritmer for den nye feature lægges i Motors Systems Tool (MST).



## 10 Motor Systems Tool

Motor Systems Tool, MST-Tool, er et beregningsværktøj til systemoptimering af elmotorsystemer, der indledningsvis er udviklet under det hedengangne ELFORSK program, *projekt nr. 344-008 – 2. generationsværktøj til systemoptimering*, og siden er blevet opdateret/udvidet i takt med ny viden er kommet til veje via efterfølgende både danske og udenlandske motorrelaterede projekter.

I MST-Tool er det muligt at designe et energieffektivt system og regne på de enkelte delkomponenter hver for sig. Det er også muligt at designe komponenternes kapacitet på en sådan måde, at deres størrelse bliver tilpasset hinanden, så det samlede system bliver så energieffektivt som muligt.



Figur 10.1 MST-Tool - forside ved beregning af et ventilatorsystem.

MST-Tool opererer med dellast data for frekvensomformere, motorer, transmissioner og belastninger. Det være sig ventilatorer, pumper, trykluft, køling og hydraulik med flere. Dette giver mulighed for at beregne energiforbrug, virkningsgrader m.m. for det samlede system i ikke bare ét, men adskillige arbejds punkter på en given installation.

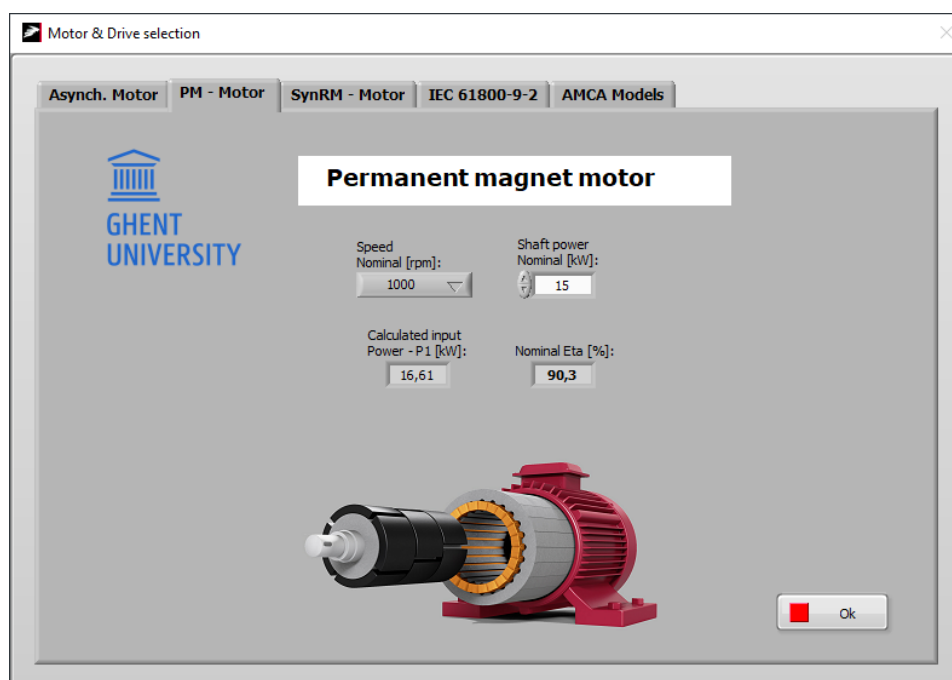
Typisk vil man indsætte en "før-situation" i form af flere arbejds punkter med tilhørende driftstider og så via MST-Tool prøve at regne på effekten af at udskifte en motor til en bedre, en ny ventilator eller måske endda montere frekvensomformerer for mere tilpassede arbejds punkter til applikationen. MST-Tool afleverer for nuværende resultatet målt i energi og driftsøkonomi.

## 10.1 Nye tabsmodeller

I dette projekt er det påvist at anvendelse af WBG-hardware i frekvensomformere frem for konventionel teknologi, giver en forøgelse af virkningsgraden. Det er ligeledes beskrevet hvordan de reducerede tab kan anvendes til at implementere filtre på ind- og udgangen af en frekvensomformer. Dette ville give anledning til reducerede tab i tilgangskabler og i den drevne motor og det, tilmed i installationer med virkningsgrader helt på højde med hvad der i dag er BAT (Best Available Technology).

Disse nyfundne tabsmodeller for WBG-implementering vil fremadrettet være at finde i standard-modellerne for tab i MST-Tool. Her vil der ligeledes kunne til- og fravælges om der anvendes sinusfiltre eller tilsvarende.

På samme måde vil dette projekts gennemførte laboratiormålinger foretaget på konventionelt udstyr danne grundlag for en verificering (opdatering) af de eksisterende modeller for denne slags udstyr, og vil blive implementeret i de fremtidige tabsmodeller for MST-Tool.



Figur 10.1.1 MST-Tool, Motor & Drive selection – valg af PM-motor.

Den næste "maintenance" runde for MST-Tool er planlagt til foråret af 2025 og det er først her at resultaterne fra dette projekt reelt vil kunne ses i værktøjet. Det giver i praksis bedst mening, da der er adskillige faktorer, der indgår i en udgivelse af en opdateret version af MST-Tool.

MST-Tool kan til enhver tid downloades gratis via:

<https://www.iea-4e.org/ems/our-work/ems-tools/>

## 11 Demonstration af teknologier

I dette projekt har virksomhederne Danfoss Drives og Hydraulico indgået som projektpartnere med det formål, at stille nogle udvalgte anlæg til rådighed som cases for projektet. De udvalgte systemer er blevet målt før og efter implementering af én eller flere af de udviklede løsninger.

### 11.1 Danfoss Drives

Danfoss Drives har i mere end 50 år været verdensførende indenfor variabel hastighedsregulering af elektriske motorer. Virksomheden har gennem årene leveret frekvensomformere til verdensmarkedet, hvor virksomhedens markedsandel er meget betydelig.

#### 11.1.1 Ventilation i hal i Gråsten

Hos Danfoss i Gråsten blev det besluttet at udskifte en ældre radialventilator med F-hjul og motor med en aksialventilator og en permanentmagnet motor (IE5).



Figur 11.1.1.1 Ældre radialventilator og motor.

I figur 11.1.1.2 ses mærkepladen på motoren.



Figur 11.1.1.2 Mærkeplade på motoren.

Motoren er en 10 kW 4-polet asynkronmotor med et nominelt omdrejningstal på 1.470 omdr./min. Motorens er omdrejningstal reguleres ved hjælp en frekvensomformer.



Figur 11.1.1.3 Frekvensomformer til regulering af omdrejningstallet.

Målingen af luftmængden blev foretaget i kanalen efter ventilatoren.



Figur 11.1.1.4 Målehuller i kanalen efter ventilatoren.

I tabel 11.1.1.1 ses målingerne på ventilatoren.

Luftmængde [m <sup>3</sup> /h]	Total trykstigning [Pa]	Effektoptag P1 [kW]	P-aksel (nominel) [kW]	Hydraulisk effekt P4 [kW]	Belastningsgrad [%]
23.570	595	7,4	10	3,90	39,0
16.140	385	3,6	10	1,73	17,3

Tabel 11.1.1.1 Målinger på ventilatoren.

I tabel 11.1.1.2 ses beregninger af totalvirkningsgrad, motorvirkningsgrad og ventilatorvirkningsgrad.

Luftmængde [m <sup>3</sup> /h]	Eta-total [%]	Eta-motor (MST-Tool) [%]	Eta-ventilator [%]
23.570	52,6	84,9	62,0
16.140	47,9	80,8	59,3

Tabel 11.1.1.2 Totalvirkningsgrad, motorvirkningsgrad og ventilatorvirkningsgrad.

I figur 11.1.1.5 ses den nye aksialventilator.



Figur 11.1.1.5 Ny aksialventilator.

I figur 11.1.1.6 ses mærkeplade for ventilatoren og motoren for den nye aksialventilator.

Motor Name Plate		ZerAX		Year of Manufacture 2022
Fan Part	AZL-710350-45-2 220	Type / Size	AZL-710350-45-2	
Fan Serial No.	AIRBON-AXIAL1801	Part No./Order no.	1100431 - 1 / 6573	
Blade		Blade Quantity	6	PCB
Conel 10P AZ 221-03-40-1730 Ceramic 7.9		Blade Angle	45	
Motor Part No.	927300-0	Blade Material	ALU	
Efficiency Class	IE5	Max Speed at 20°C	2061	r/min
Rated Power	7.9 kW	Speed	3320	r/min
Rated Speed	1730 rpm	Supply Voltage [V]	3x400	
Rated Voltage [V]	16 A	Supply Frequency	50	Hz
Temperature Rise Class	B	Actual Motor Frequency	110	Hz
Insulating Class	F	Efficiency η [%]	78.73	
Enclosure	IP53	Measurement Category [A-D]	D	
Bearing	B14	Efficiency Category	Total	
Ambient Temperature	40 Cel	Efficiency Grade [%]	84.7	
Weight	41.4 kg	Target Efficiency Grade [%]	53.9	
Rated Power Factor	1	VFD	For PM motor	
		Serial No.	AIRBON-AXIAL1801	

Figur 11.1.1.6 Mærkeplade for ventilatoren og motoren.

Motoren er en 7,9 kW 10-polet permanentmagnet motor (IE5) med et nominelt omdrejningstal på 1.730 omdr./min.. I tabel 11.1.1.3 ses målingerne på ventilatoren.

Luftmængde [m <sup>3</sup> /h]	Total trykstigning [Pa]	Effekttag P1 [kW]	P-aksel (nominel) [kW]	Hydraulisk effekt P4 [kW]	Belastningsgrad [%]
23.270	610	6,5	7,9	3,94	49,9
16.781	360	2,7	7,9	1,68	21,2

Tabel 11.1.1.3 Målinger på ventilatoren.

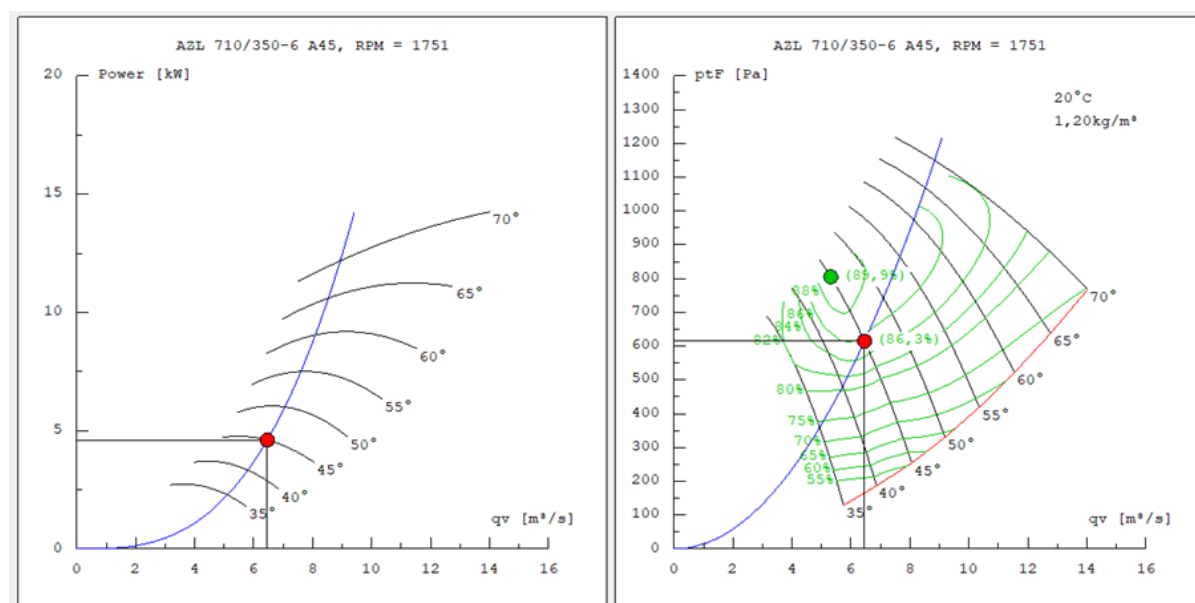
I tabel 11.1.1.4 ses beregninger af totalvirkningsgrad, motorvirkningsgrad og ventilatorvirkningsgrad.

Luftmængde [m <sup>3</sup> /h]	Eta-total [%]	Eta-motor (MST-Tool) [%]	Eta-ventilator [%]
23.270	60,7	91,3	66,4
16.781	62,2	86,4	71,9

Tabel 11.1.1.4 Beregninger af totalvirkningsgrad, motorvirkningsgrad og ventilatorvirkningsgrad.

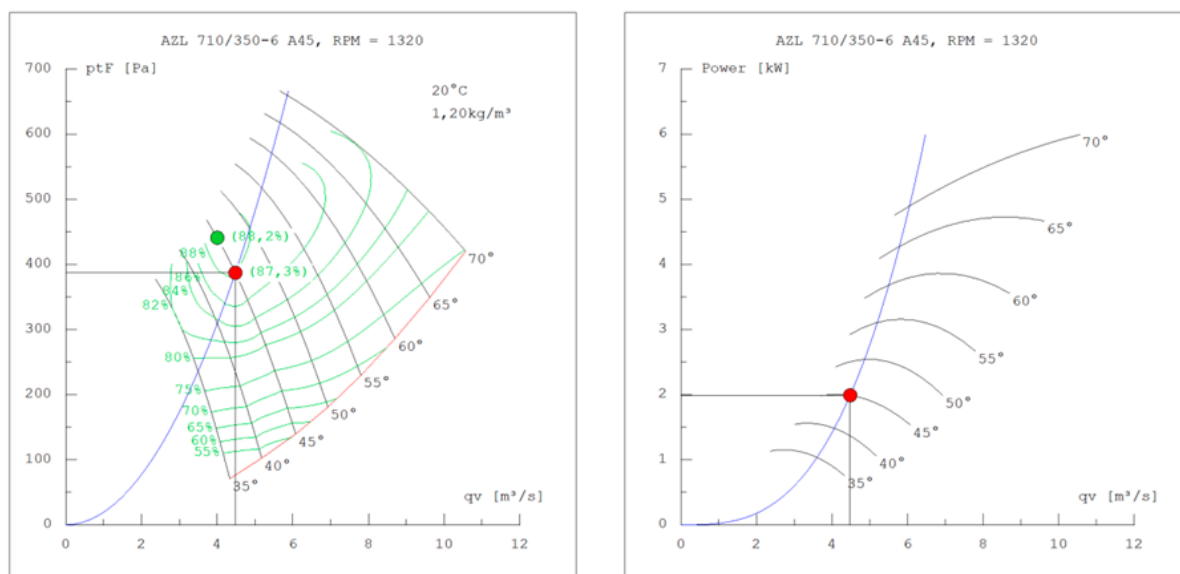
Som det ses i tabel 11.1.1.4 er ventilatorvirkningsgraderne overraskende lave.

I figur 11.1.1.7 ses den tilførte effekt til ventilatoren og ventilatorvirkningsgraden ved en luftmængde på 23.270 m<sup>3</sup>/h og en total trykstigning på 610 Pa. Ventilatorvirkningsgraden burde være 86,3% i dette driftspunkt.



Figur 11.1.1.7 Tilført effekt til ventilatoren og ventilatorvirkningsgraden ved 23.270 m<sup>3</sup>/h og 610 Pa.

I figur 11.1.1.8 ses den tilførte effekt til ventilatoren og ventilatorvirkningsgraden ved en luftmængde på 16.781 m<sup>3</sup>/h og en total trykstigning på 360 Pa. Ventilatorvirkningsgraden burde være 87,3% i dette driftspunkt.



Figur 11.1.1.8 Tilført effekt til ventilatoren og ventilatorvirkningsgraden ved 16.781 m<sup>3</sup>/h og 360 Pa.

Ved en luftmængde på 23.270 m<sup>3</sup>/h og en total trykstigning på 610 Pa er ventilatorvirkningsgraden 19,9% point lavere end forventet, mens motorvirkningsgraden er 6,4% bedre. Og ved en luftmængde på 16.781 m<sup>3</sup>/h og en total trykstigning på 360 Pa er ventilatorvirkningsgraden 15,4% point lavere end forventet, mens motorvirkningsgraden er 5,6% bedre.

Det er sandsynligt, at indløbsforholdene tæt på betongulvet og væggen (se figur 11.1.1.5) plus udløbsforholdene med en bøjning lige efter ventilatoren giver nogle uheldige forstyrrelser (se figur 11.1.1.9), som samlet set er årsagen til ventilatorens dårlige virkningsgrad.



Figur 11.1.1.9 Udløbsforholdene med en bøjning lige efter ventilatoren.

Virkningsgraderne i Novenco's beregningsprogram er baseret på målinger under standardiserede forhold med optimale ind- og udløbsforhold.

### **11.1.2 Køleanlæg i en 365'butik i Nordborg**

Danfoss Drives har opbygget et køleanlæg i en 365 dagligvarebutik i Nordborg, der anvender den nyeste, energieffektive motorteknologi. Køleanlægget fungerer som demonstrationsanlæg for at vise mulighederne i dels energieffektiv motorteknologi og at køleanlæg med fordel kan indgå i den kommende sektorkobling mellem f.eks. fjernvarmesektoren og virksomheder med overskudsvarme til rådighed.

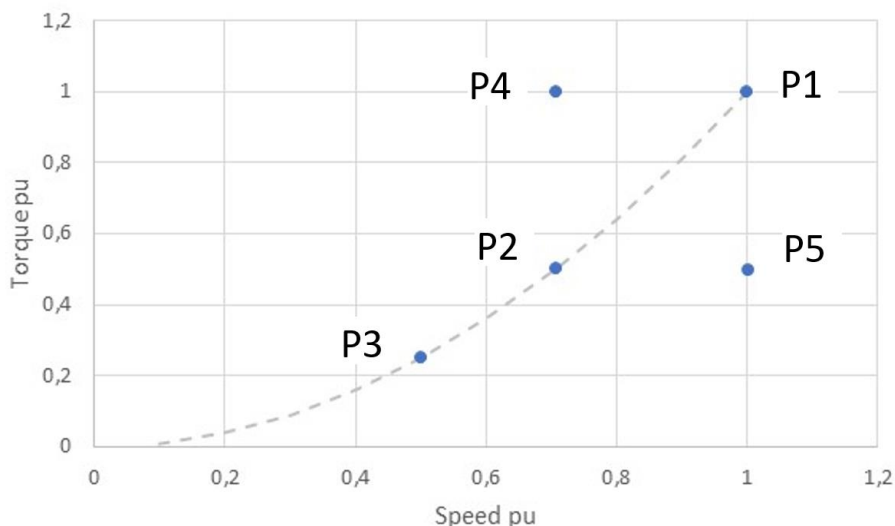
Køleanlægget anvender CO<sub>2</sub> som kølemiddel og er udrustet med fire kompressorer til køling og to kompressorer til frost. Alle kompressorerne er udrustet med line-start PM motorer, der kan drives direkte uden frekvensomformere. Motorerne er dog forsynet med frekvensomformere, så kompressorernes drift kan tilpasses behovet ved dellast.

Ved siden af demonstrationsanlægget er der etableret et traditionelt køle-/frostanlæg med to kompressorer til både køling og frost, der anvendes som referenceanlæg til det energieffektive demonstrationsanlæg. Dette anlæg anvender ligeledes CO<sub>2</sub> som kølemiddel. Kompressorerne er udrustet med almindelige asynkronmotorer, og kompressorydelsen styres ligeledes med frekvensomformere.



Der er udført en række forsøg med den motortype, der anvendes i demonstrationsanlægget for at undersøge om det er muligt at øge motorernes virkningsgrad ved at optimere indstillingerne i frekvensomformereren.

Motorene blev analyseret i en testbænk for at opnå så præcise resultater som muligt. Motorene blev udsat for driftssituationer hvor belastningen (momentet) og hastigheder fulgtes ad, samt hvor belastningen og hastigheden lå både over og under idealkurven, se figur 11.1.2.1.



Figur 11.1.2.1 Driftpunkter under tests og forbedring i motorvirkningsgrad samt effektfaktor.

En standard frekvensomformer vil drive kompressormotorene, der er line-start PM motorer, som om de er asynkronmotorer. Derfor vil spændingen fra frekvensomformereren ikke matche behovet til en PM motor, da den ikke behøver magnetiseringsstrøm. Det vil typisk betyde, at spændingen under dellast er for høj, hvilket giver forringet motorvirkningsgrad.

Under testene blev motorene først drevet med en standard frekvensomformer. Dernæst blev de drevet med en frekvensomformer, hvor det var muligt at foretage en manuel justering af spændingen i de fem testpunkter, så der blev opnået den bedste virkningsgrad.

Test [-]	Motorvirkningsgrad [%]	Effektfaktor [-]
P1	+0,1	+0,1
P2	+1,0	+0,18
P3	+4,0	+0,47
P4	+1,0	+0,15
P5	+0,7	+0,15

Tabel 11.1.2.1 Forbedring i motorvirkningsgrad samt effektfaktor.

Som det ses i tabel i tabel 11.1.2.1 er det muligt at forbedre motorvirkningsgraden ved at optimere spændingen fra frekvensomformereren. Dette gælder især under dellast, hvilket er en vigtig observation, da motorer drives i dellast langt det meste af tiden.

I fremtiden vil der blive arbejdet på at integrere en algoritme i frekvensomformerne der kontinuerligt optimerer den afgivne spænding, så motorvirkningsgraden til enhver tid er optimal.

## 11.2 Hydraulico A/S

Hydraulico blev grundlagt i Danmark i 1946. I løbet af virksomhedens historie har Hydraulico produceret over 4.000 presser til kunder rundt om i verden.

Design, konstruktion og produktion af avancerede hydrauliske presser er stadig Hydraulicos kernekompetencer. Ved at udnytte den seneste udvikling inden for hydraulik, robotik, softwareløsninger og computerbaserede automatiseringssystemer designer og leverer virksomheden specialdesignede produktionslinjer.

Hydraulico har repræsenteret over hele verden, og virksomheden mestrer hele spektret af teknologier i forbindelse med fremstilling med hydrauliske presser.

### 11.2.1 Hydraulisk presse hos Klokkerholm

Hydraulico har installeret en ny hydraulisk presse hos virksomheden Klokkerholm til presning af produkter i metalplade. Pressen er forsynet med en hydraulikpumpe af typen aksialstempel-pumpe, som kan yde et flow på 405 liter pr. minut ved 1.500 rpm. Hydraulikpumpen kan yde et maksimalt tryk på 360 bar, og er med variabelt displacement (flowregulering). Pumpen drives af en 4-polet 90 kW asynkronmotor, der er nettilsluttet.

I figur 11.2.1.1 ses den hydrauliske presse. Metalemnerne, som skal presses, tilføres pressen ved hjælp af en robotarm.



Figur 11.2.1.1 Hydraulisk presse hos Klokkerholm.

I figur 11.2.1.2 ses elmotoren (rød ring), som driver pumpen.



Figur 11.2.1.2 Elmotoren på den hydraulisk presse hos Klokkerholm.

En cyklus varer ca. 2 minutter, og i dette tidsrum arbejder pressen i ca. 20 sekunder. Resten af tiden kører pumpen i standby. I figur 11.2.1.3 og 11.2.1.4 ses tryk- og elmålinger på pressen.

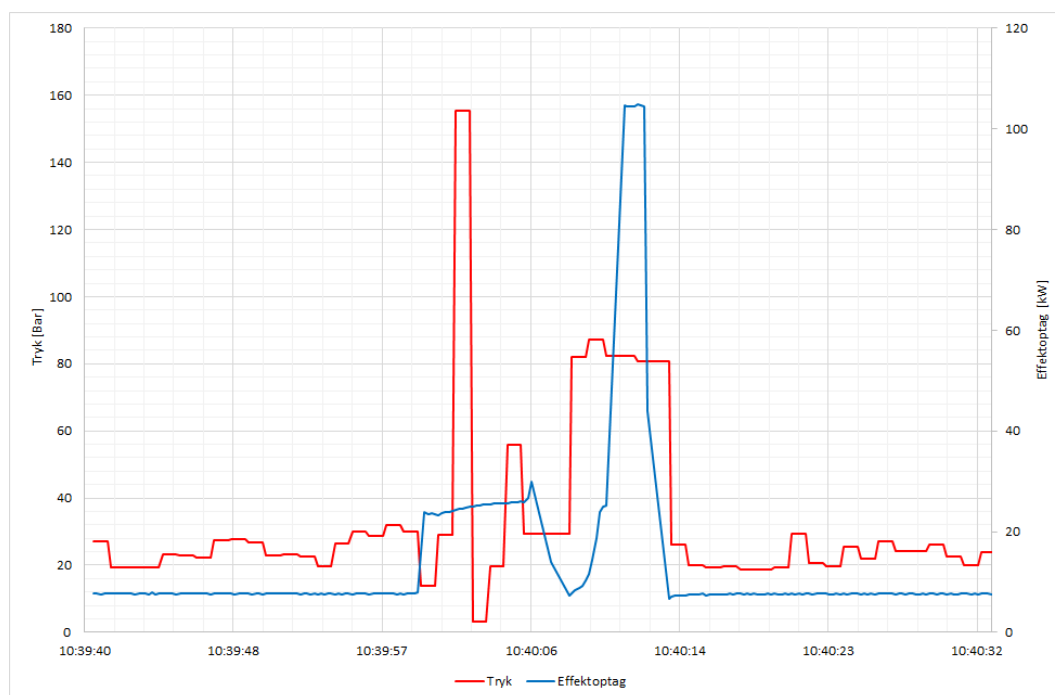
Der er, som det ses i figur 11.2.1.4, to tryksekvenser. En første sekvens med et gennemsnitstryk på ca. 53 bar (effekttag på ca. 24 kW i gennemsnit) og en anden sekvens med et gennemsnitstryk på ca. 83 bar (effekttag på ca. 47 kW i gennemsnit). Det maksimale tryk er, som det ses, på ca. 155 bar. Det maksimale effekttag er på ca. 105 kW.

Pumpen kører i standby i ca. 83% af tiden, og effekttaget i standby er ca. 7,5 kW.

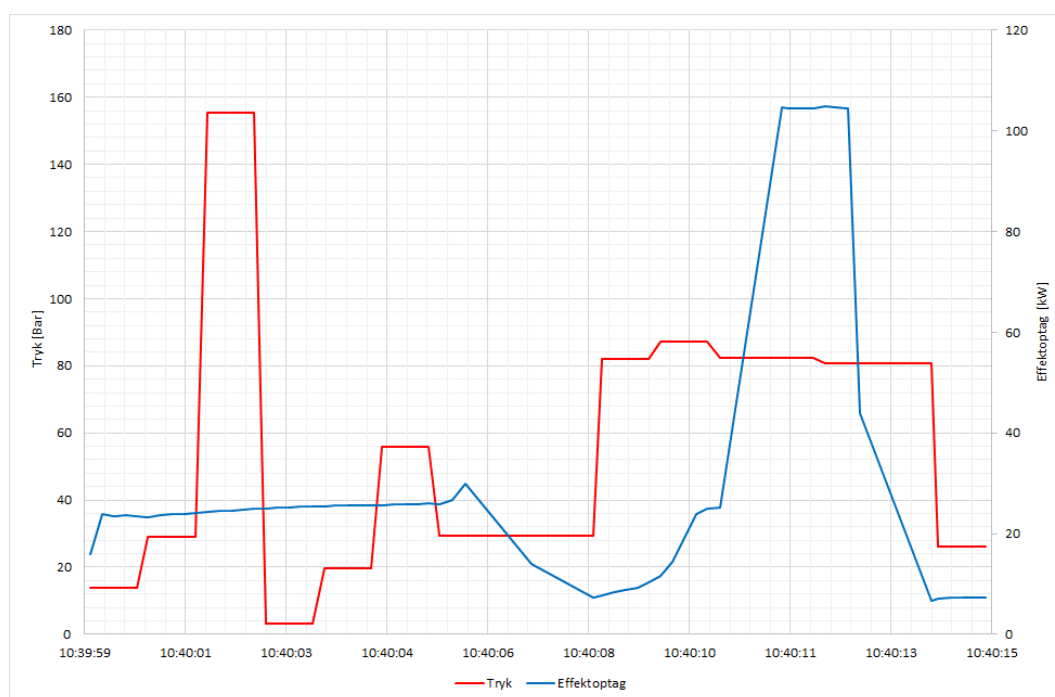
Elforbruget til en cyklus er beregnet til 0,412 kWh.

Selvom pumpens displacement er variabelt og flowet dermed er reduceret i standby, er effekttaget relativt højt. Det antages at være muligt at reducere effekttaget ved at montere en frekvensomformer på motoren. Denne mulighed vil dog formentlig ikke være rentabel.

Det skønnes, at elforbruget kan reduceres med ca. 0,15 kWh pr. cyklus, svarende til ca. 36%.



Figur 11.2.1.3 Tryk- og elmåling på den hydrauliske presse.



Figur 11.2.1.4 Tryk- og elmåling på den hydrauliske presse.

En anden og måske bedre/mere energirigtig metode er at benytte en bypass-ventil til tanken der styres af signal fra pressen. Denne løsning kaldes load-sensing, men er ikke undersøgt nærmere i denne case.

Tidligere undersøgelser<sup>3</sup> på området har vist, at det samlede elforbrug til hydraulik i industrien udgør i alt 184,8 GWh, hvoraf det totale potentiale for energieffektivisering antages at være 63.5 GWh, svarende til 34% af industriens nuværende elforbrug til hydraulik. Det potentiale der blev identificeret i dette tilfældet svarer således overens med tidligere erfaringer.

## 12 Formidling

### 12.1 National formidling

Efter projektets afslutning (første halvår af 2025) vil Teknologisk Institut afholde et webinar, hvor resultaterne fra projektet og Motor System Tool (MST) præsenteres. Der inviteres bredt ud blandt drifts- og energiansvarlige i virksomheder, motorleverandører, energisynskonsulenter, tekniske eksperter, energirådgivere, energiselskaber og andre med behov for ny viden om frekvensregulering af elmotorer.

Ligeledes vil Teknologisk Institut bidrage med et indlæg på temadagen for Energi- og Klimasynsførende virksomheder i november 2025, således at energisynskonsulenterne er bekendt med projektets resultater samt MST.

Der er udarbejdet og indsendt en artikel om projektet og dets resultater, der bliver bragt i HVAC magasinet.

Endelig bliver resultaterne fra projektet lagt op på Teknologisk Institut's hjemmeside ([www.teknologisk.dk](http://www.teknologisk.dk)) ligesom det forventes at resultaterne vil blive gjort tilgængelige på ELFORSK's hjemmeside.

### 12.2 International formidling

Der vil blive udarbejdet en artikel om projektet og dets resultater, der vil blive offentliggjort på hjemmesiden for 4E EMSA (Electric Motor Systems Annex), som Teknologisk Institut er en del af. Her ligger i forvejen MST værktøjet til systemoptimering samt flere andre værktøjer der er udviklet af Teknologisk Institut ([www.iea-4e.org/emsa](http://www.iea-4e.org/emsa)).

Endelig vil projektets resultater blive offentliggjort på internationale konferencer, som f.eks. EEMODS og Motor Summit, - både for at udbrede kendskabet til frekvensregulering og WPG teknologien, og for at positionere Danmark som videnscenter for motorteknologi.

---

<sup>3</sup> ELFORSK 349-016 – Optimering af hydrauliksystemer design- og optimeringsværktøj