

# Laboratoriemålinger af asynkronmotorers spændingsafhængighed

Delrapport til  
Elforsk PSO-projekt nr. 343-004

Januar 2012

# **Laboratoriemålinger af asynkronmotorers spændingsafhængighed**

Forfattere:

Claus M. Hvenegaard, Teknologisk Institut  
Mogens Johansson, Dansk Energi Analyse A/S

Januar 2012

# Indholdsfortegnelse

Side

SAMMENFATNING .....	3
1 INDLEDNING.....	4
2 MÅLEOPSTILLING .....	4
2.1 BESKRIVELSE AF MÅLEOPSTILLINGEN .....	4
2.2 DATAREGISTRERINGEN .....	5
2.3 MÅLEUSIKKERHED .....	5
3 DATA FOR ASYNKRONMOTORERNE.....	7
4 MÅLERESULTATER VED SYMMETRISK SPÆNDING .....	7
4.1 ABB 4-POLET 1,1 kW EFF1 MOTOR.....	7
4.2 LOHER 4-POLET 5 kW MOTOR (FRA 1978) .....	10
4.3 ABB 4-POLET 5,5 kW EFF1 MOTOR.....	12
4.4 BBC 2-POLET 18,5 kW MOTOR .....	15
4.5 ABB 2-POLET 18,5 kW EFF1 MOTOR.....	17
5 VURDERING AF MOTORERS OPTAGNE EFFEKT OG ELFORBRUG VED FORSKELLIGE SPÆNDINGER .....	20
6 MÅLERESULTATER VED USYMMETRISK SPÆNDING.....	25
6.1 ABB 4-POLET 5,5 kW EFF1 MOTOR.....	25
7 VURDERING AF MOTORERNES OPTAGNE EFFEKT VED USYMMETRISK SPÆNDING .....	28
7.1 TEORETISK BEREGNING .....	28
7.2 VURDERING AF MÅLINGERNE I AFSNIT 6.....	30
8 MÅLERESULTATER FOR MOTOR MED FREKVENSSOMFORMER .....	31
8.1 GRUNDFOS 4-POLET 4 kW MOTOR – SYMMETRISK SPÆNDING .....	31
8.2 GRUNDFOS 4-POLET 4 kW MOTOR – USYMMETRISK SPÆNDING .....	33
8.3 KOMMENTARER TIL MÅLINGERNE PÅ MOTOR MED FREKVENSSOMFORMER.....	36
9 KONKLUSION VEDR. ERHVERVSLIVETS MOTORER .....	37
BILAG 1. KORT BESKRIVELSE AF ELFORSK-PROJEKT NR. 343-004: .....	39

## Sammenfatning

Som led i Elforsk-projektet "Spændingsstyring i erhvervsvirksomheder – værktøj til fastlæggelse af muligheder og besparelspotentialer" er der hos Teknologisk Institut gennemført målinger på en række motorer af deres optagne effekt og motortab samt af de øvrige elektriske data ved seks spændingsniveauer i intervallet 330 – 440 V (fasespænding 191 – 254 V). Målingerne er udført på tre nye motorer på 1,1, 5,5 og 18,5 kW samt på to ældre på 5 og 18,5 kW, alle direkte forsynede, samt på en 4 kW motor, forsynet via frekvensomformer. Målingerne er udført med symmetriske spændinger, og for 4 kW samt 5,5 kW motoren er der også målt ved usymmetrisk spænding.

Målingerne på de direkte forsynede motorer viser, at virkningsgraden falder, når spændingen sænkes. Dette gælder ved belastninger over 40 – 80% af mærkelasten, afhængigt af motortypen. Ved lavere belastninger øges virkningsgraden, når spændingen sænkes. Sænkes spændingen, forbedres effektfaktoren ( $\cos \varphi$ ) ved alle belastninger. Ved lave belastninger er forbedringen så stor, at strømmen også falder, trods den lavere spænding. Omdrejningstallet falder ved lavere spænding, uanset belastningen.

Ved usymmetrisk spænding til en direkte forsynet asynkronmotor falder virkningsgraden i forhold til ved symmetrisk spænding. Ved en stærkt usymmetrisk spænding, hvor spændingen i én fase er 80% af spændingen i de to andre faser, er den maksimale virkningsgrad for 5,5 kW motoren blevet målt til 86% mod 89% ved en symmetrisk spænding på 398 V.

Målingerne på 4 kW motoren, der forsynes via frekvensomformer, viser, at virkningsgraden for motor inklusive omformer er næsten uafhængig af spændingen og af eventuelle usymmetrier i spændingsforsyningen til frekvensomformeren. Kun ved frekvenser på eller nær 50 Hz er der en svag spændingsafhængighed.

Ud fra måleresultaterne er motorernes optagne effekt beregnet for spændinger på 400 V og 360 V ved flere belastninger og ved både konstant og kvadratisk moment. Beregningerne viser, at forskellen i optagen effekt afhænger af motorstørrelsen og af motorens belastningsgrad. Forskellen er størst for små motorer, hvor effekten ved 10% lavere spænding kan falde op til typisk 20% for en motor, belastet under 5%. Ved belastninger over 40% er motorens optagne effekt næsten den samme ved 360 V som ved 400 V.

Når spændingen sænkes, kører motoren lidt langsommere og må derfor køre en smule længere tid for at yde et bestemt arbejde, f. eks. løft af en elevator eller ventilation af en bestemt luftmængde. Da elforbruget er effekt gange tid, vil elbesparelsen ikke være helt den samme som forskellen i optagen effekt. Beregningerne for de fem motorer viser imidlertid, at effekten og elenergien ændrer sig næsten lige meget, så det i praksis normalt ikke er nødvendigt at skelne mellem forskellen i optagen effekt og elbesparelsen for direkte forsynede asynkronmotorer.

EU's krav om højere effektivitet for nye motorer vil med tiden øge den gennemsnitlige virkningsgrad for erhvervsvirksomhedernes motorer og dermed mindske disses spændingsafhængighed.

Claus M. Hvenegaard  
Teknologisk Institut

# 1 Indledning

Elforsk gav i 2011 tilskud til projektet " Spændingsstyring i erhvervsvirksomheder – værktøj til fastlæggelse af muligheder og besparelspotentialer" (PSO 343-004), der bl. a. har til formål at udvikle et værktøj til vurdering af elbesparelsen ved at sænke spændingen i erhvervsvirksomheder. Projektet udføres af Dansk Energi Analyse A/S, Teknologisk Institut, elselskaberne Lokalenergi og NRGi samt Københavns Lufthavne.

Til brug for udviklingen af værktøjet er der gennemført målinger på Teknologisk Instituts elmotorprøvestand af en række asynkronmotorer ved forsyningsspændinger i intervallet 330-440 V (fasespændinger 191-254 V). Målingerne er udført ved momenter på 0-110% af mærkemomentet. Der er målt på direkte forsynede motorer ved symmetrisk spændingsforsyning og på en motor med frekvensomformer. For to motorer er der også målt med usymmetrisk spændingsforsyning for at vurdere størrelsen af de ekstra tab som følge af usymmetrien.

## 2 Måleopstilling

I dette kapitel ses en beskrivelse af måleopstillingen, dataregistreringen og – behandlingen samt måleusikkerhed.

### 2.1 Beskrivelse af måleopstillingen

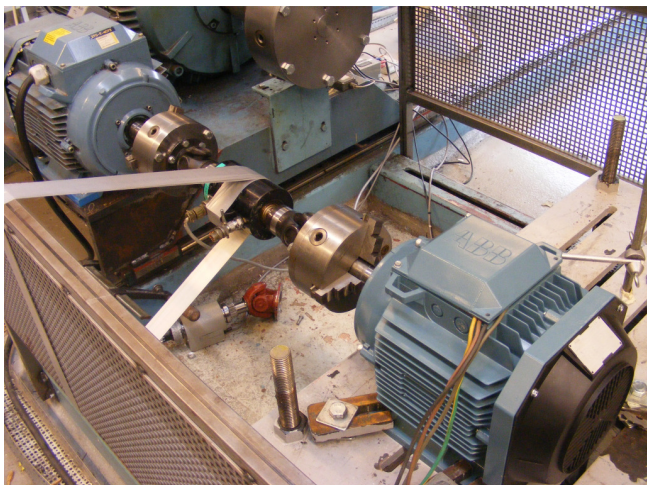
Testmotoren (se figur 2.1 til højre) forsynes vha. en variotransformator (se figur 2.3), som muliggør individuel indstilling af netspændingen i de tre faser. Spændingsniveauet kan variere fra 0 – 440 V netspænding.

Den tilførte effekt til testmotoren måles vha. en effektanalysator (se figur 2.4).

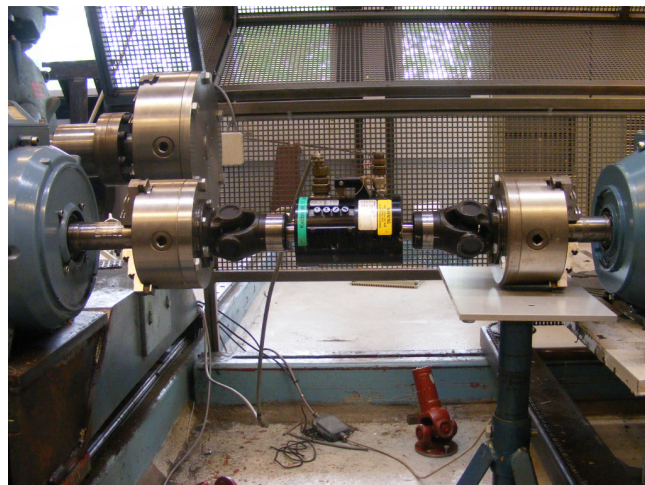
Belastningen af testmotoren udgøres af en 15 kW 4-polet motor (se figur 2.1 til venstre), der fungerer som generator og bremses regenerativt vha. en frekvensomformer (se figur 2.5).

Motorens akselmoment måles med en momentmåler (se figur 2.2).

Omdrejningstallet måles med en digital pulsgiver, som er monteret på 15 kW generatoren.



Figur 2.1. Momentbænk med 5,5 kW testmotor og 15 kW belastningsmotor (generator)



Figur 2.2. Momentmåler

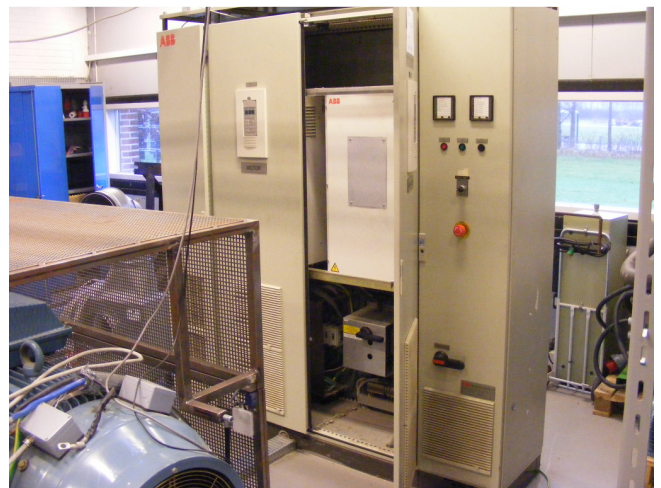




Figur 2.3. Variotransformator



Figur 2.4. Effektanalysator



Figur 2.5. Frekvensomformer til styring af belastningsmotor (generator)

## 2.2 Dataregistreringen

Ved 8 forskellige belastninger mellem 0 og 110 % af nominelt moment samt ved 6 forskellige spændinger mellem 330 og 440 V er der målt samhørende værdier for moment, spænding, strøm, effektfaktor (Power Faktor), omdrejningstal og effektoptag.

Momentmålerens måleområde er mellem 0 og 110 Nm. Strømtransformerne, som er koblet til effektanalysatoren, har et måleområde mellem 0 og 100 A. Til måling af motorens omdrejningstal anvendes en omdrejningstæller (encoder), som har et måleområde mellem 0 og 3.000 rpm.

Alle målesignaler føres til en PC via en standard RS232/IEEE488 forbindelse. Databehandlingen foretages vha. programmet LABVIEW.

## 2.3 Måleusikkerhed

Forsyningsspændingen til motoren kommer fra en variotransformer. Denne spænding varierer maks.  $\pm 1$  V.

Virkningsgraden for motoren kan skrives således:

$$\eta_{motor} = \frac{M \cdot \omega}{P_1}$$

Unøjagtigheden  $U_\eta$  på virkningsgradsberegningen kan skrives således:

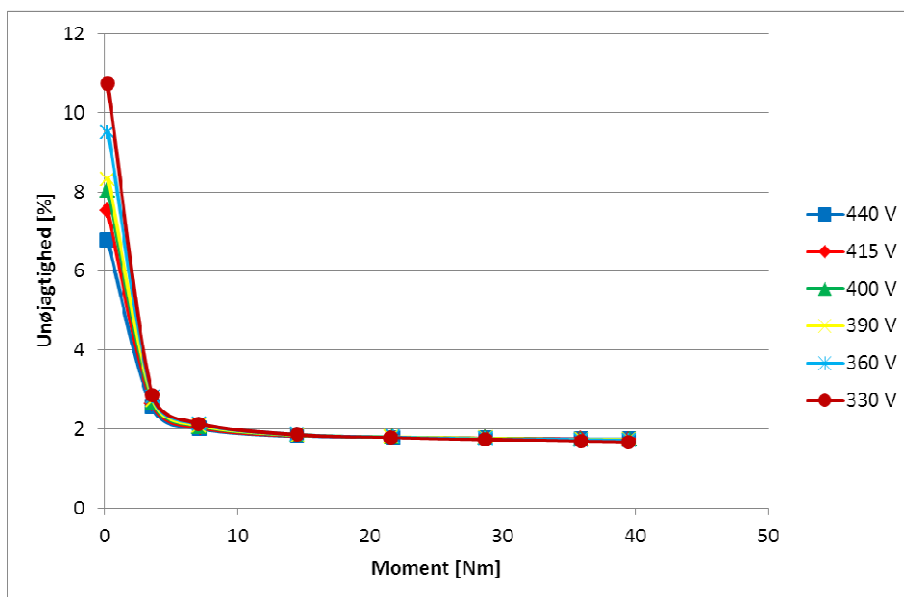
$$U_\eta = \sqrt{\left(\frac{\delta_\eta}{\delta_M} \cdot u_M\right)^2 + \left(\frac{\delta_\eta}{\delta_\omega} \cdot u_\omega\right)^2 + \left(\frac{\delta_\eta}{\delta_{P_1}} \cdot u_{P_1}\right)^2} \Rightarrow$$

$$U_\eta = \sqrt{\left(\frac{\omega}{P_1} \cdot u_M\right)^2 + \left(\frac{M}{P_1} \cdot u_\omega\right)^2 + \left(\frac{-M \cdot \omega}{(P_1)^2} \cdot u_{P_1}\right)^2}$$

Nedenfor ses unøjagtighederne på momentmålingen ( $u_M$ ), omdrejningstalsmålingen ( $u_\omega$ ) og effektmålingen  $u_{P_1}$ :

- $u_M$  er 0,1 % af maks. (110 Nm): 0,11 Nm
- $u_\omega$  er 0,1 % af maks. (3.000 rpm): 3 rpm
- $u_{P_1} = \left(\left(\left(0,0005 \cdot U + 0,0005 \cdot 500\right) \cdot I \cdot PF\right)^2 + \left(\left(0,0005 \cdot I + 0,0005 \cdot 20 + 0,0001\right) \cdot U \cdot PF\right)^2 + \left(0,04 \cdot P_1 / (100 \cdot PF)\right)^2\right)^{0,5}$

I figur 2.6 ses beregninger af unøjagtigheder som funktion af momentet på beregninger af motorvirkningsgrader ved forskellige spændinger for en 5,5 kW motor.



Figur 2.6. Unøjagtigheden på beregninger af motorvirkningsgrader for 5,5 kW motor som funktion af momentet og ved forskellige spændinger

Som det ses, ligger unøjagtigheden på mellem 1,75 % og 2 % i området fra 110 % til 20 % af nominelt moment. Ved 10 % af nominelt moment er unøjagtigheden ca. 2,7 %. Ved lavere momenter stiger unøjagtigheden betragteligt.

Ved større motorer vil unøjagtigheden være lavere, mens den ved mindre motorer vil være højere. For en 18,5 kW motor vil unøjagtigheden ligge mellem 1 % og 1,5 % i området fra 110 % til 10 % af nominelt moment. For en 1,1 kW motor vil unøjagtigheden ligge mellem 2 % og 3,5 % i området

fra 110 % til 40 % af nominelt moment. Ved 20 % af nominelt moment er unøjagtigheden ca. 5 %. Ved lavere momenter stiger unøjagtigheden betragteligt.

De store unøjagtigheder for små motorer skyldes, at både målte momenter og målte effektoptag ligger langt fra måleinstrumenternes maksimale visning.

### 3 Data for asynkronmotorerne

I tabel 3.1 ses data for alle de målte motorer.

Fabrikat	Type-betegnelse	Effekt [kW]	Spænding [V]	Strøm [A]	Cos $\varphi$	Omdrejningstal [o/min]	Forsyning
ABB	M3AA090 LB-4	1,1	400	2,4	0,78	1.435	Direkte
Grundfos	112MB4-28-C	4	380 - 415	8,9	0,82	1.440	Frekv.omformer
Loher	CA132SA-4	5	380	10,5	0,85	1.440	Direkte
ABB	M3AA132S 4	5,5	380 – 420	11,1	0,84	1.460	Direkte
BBC	OU160 L2 BD	18,5	380	33,5	0,94	2.900	Direkte
ABB	M3AA160 MLC	18,5	380 - 420	33,5	0,9	2.936	Direkte

Tabel 3.1. Mærkedata for målte motorer

## 4 Måleresultater ved symmetrisk spænding

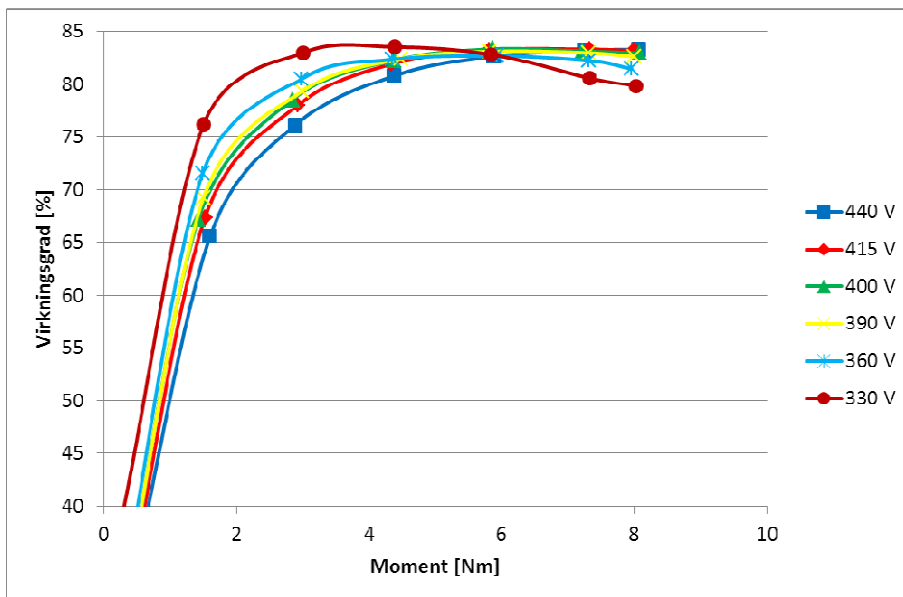
### 4.1 ABB 4-polet 1,1 kW EFF1 motor

I figur 4.1 ses, ved forskellige spændinger, virkningsgrader for en 4-polet 1,1 kW net tilsluttet motor som funktion af momentet. Motorens nominelle omdrejningstal er 1.435 rpm og det nominelle moment er ca. 7 Nm.

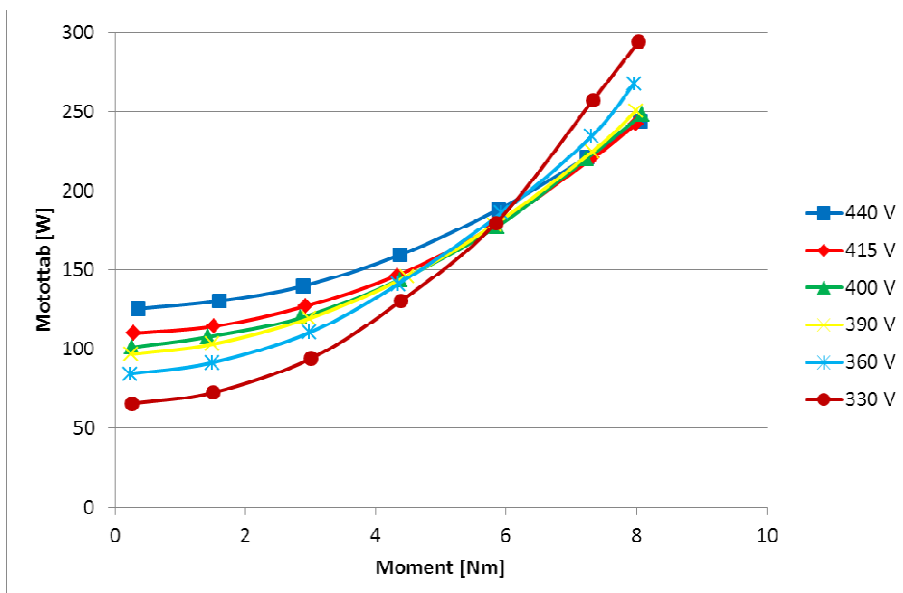
Virkningsgraden er højest ved høje spændinger, når momentet er højere end ca. 75 - 80 % af det nominelle moment. Der er dog ikke den store forskel for spændingerne 390 – 440 V. Ved nominelt moment er der ca. 3 % forskel mellem virkningsgraderne ved henholdsvis 440 V og 330 V. Tabene i motoren stiger således jo højere moment og lavere spænding der benyttes (se figur 4.2).

Når momentet er lavere end ca. 75 – 80 % af det nominelle moment er billedet omvendt. Her medfører for en høj spænding et forøget tab og dermed lavere virkningsgrad.



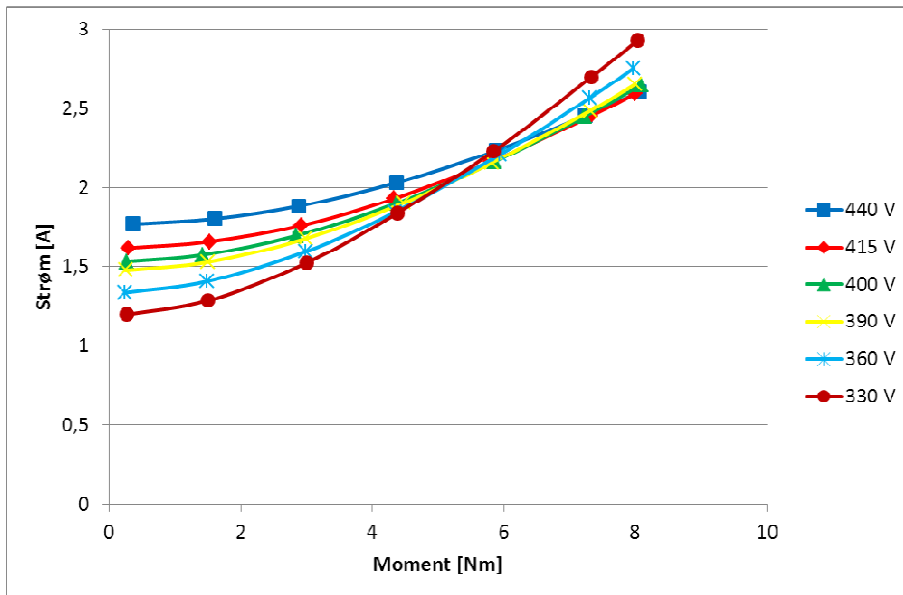


Figur 4.1. Virkningsgrader for ABB 4-polet 1,1 kW motor ved forskellige spændinger som funktion af momentet

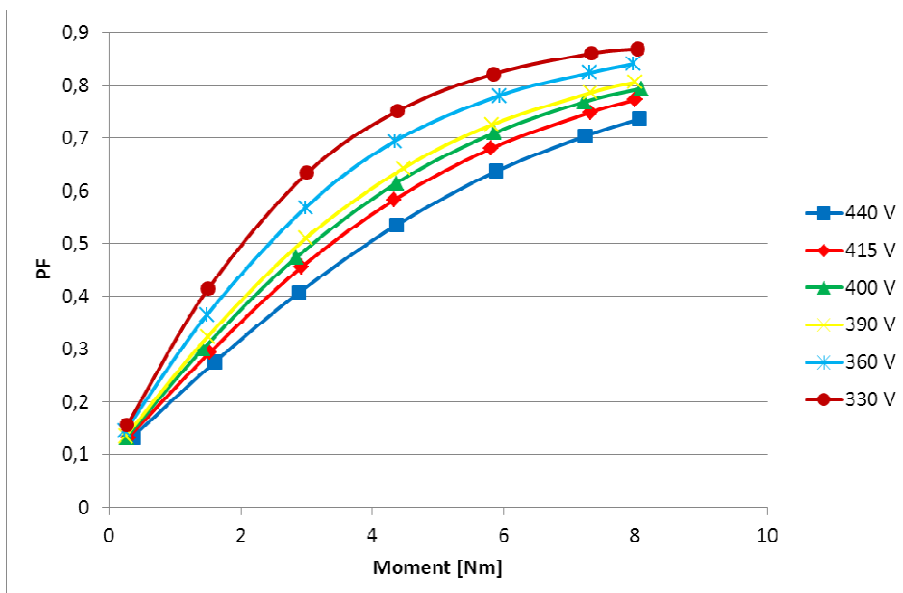


Figur 4.2. Motortab for ABB 4-polet 1,1kW motor ved forskellige spændinger som funktion af momentet

I figur 4.3 og 4.4 ses, ved forskellige spændinger, strøm og effektfaktor for motoren som funktion af momentet. Strømmen er højest ved lave spændinger, når momentet er højere end ca. 75 – 80 % af det nominelle moment. Effektfaktoren (forskellen mellem aktiv effekt og tilsyneladende effekt, dvs.  $P/S$ . For ren sinusformet spænding og strøm er effektfaktoren lig  $\cos \varphi$ ) er højest ved lave spændinger ved alle momenter.

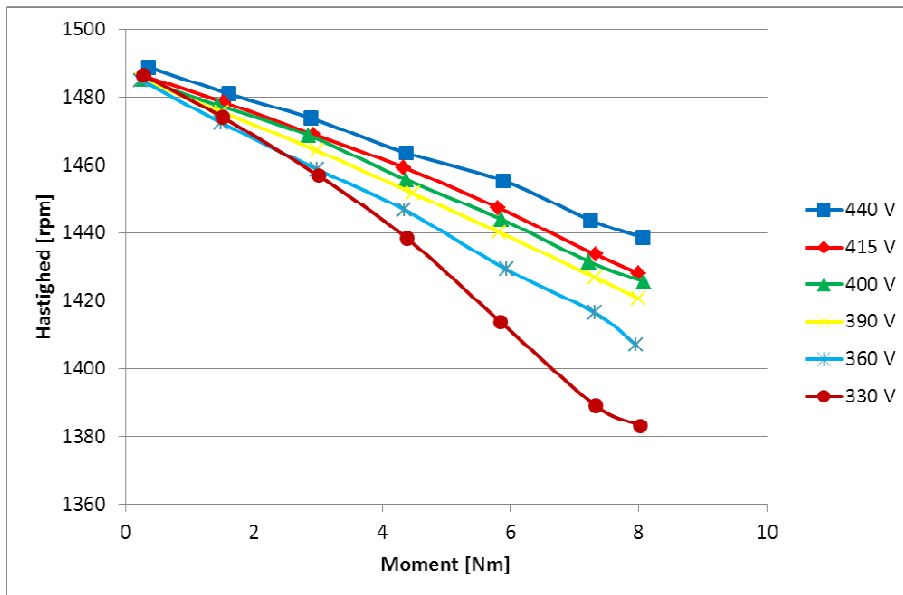


Figur 4.3. Strøm for ABB 4-polet 1,1 kW motor ved forskellige spændinger som funktion af momentet



Figur 4.4. Effektfaktor (PF) for ABB 4-polet 1,1 kW motor ved forskellige spændinger som funktion af momentet

I figur 4.5 ses omdrejningstal for motoren ved forskellige spændinger som funktion af momentet. Omdrejningstallet afhænger som det ses af momentet og spændingen. De største afvigelser mellem omdrejningstallene ses ved højere momenter. Ved ca. 8 Nm ses en forskel på ca. 60 rpm (mellem 440 V og 330 V).



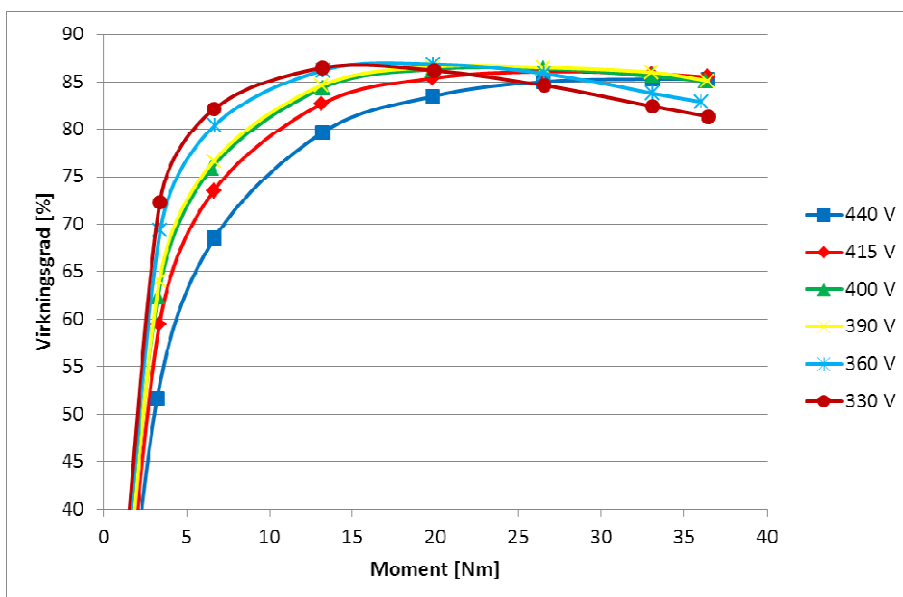
Figur 4.5. Omdrejningstal for ABB 4-polet 1,1 kW motor ved forskellige spændinger som funktion af momentet

## 4.2 Loher 4-polet 5 kW motor (fra 1978)

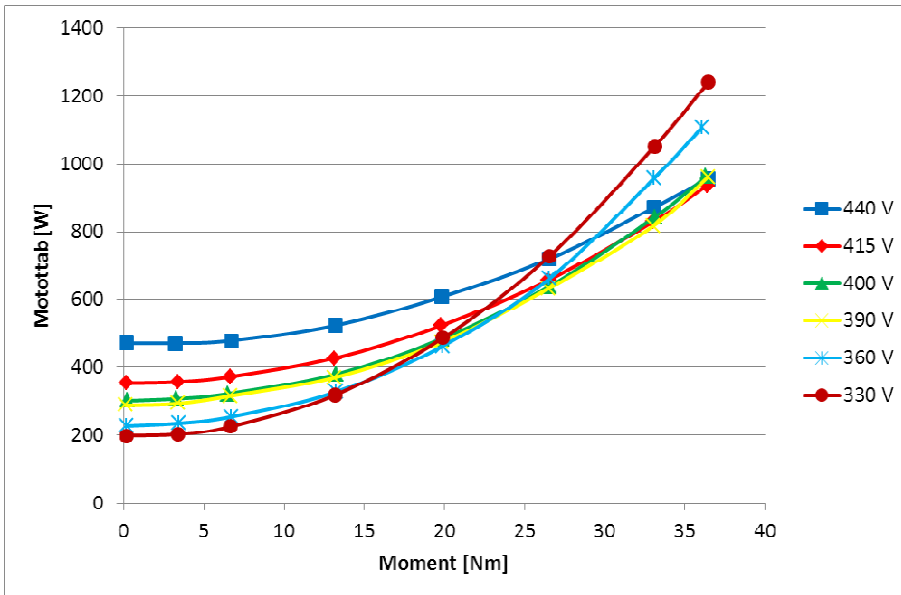
I figur 4.6 ses, ved forskellige spændinger, virkningsgrader for en 4-polet 5 kW net tilsluttet motor (fra 1978) som funktion af momentet. Motorens nominelle omdrejningstal er 1.440 rpm og det nominelle moment er ca. 33 Nm.

Virkningsgraden er højest ved høje spændinger, når momentet er højere end ca. 60 - 65 % af det nominelle moment. Der er dog ikke den store forskel for spændingerne 390 – 440 V. Ved nominelt moment er der ca. 4 % forskel mellem virkningsgraderne ved henholdsvis 440 V og 330 V. Tabene i motoren stiger således jo højere moment og lavere spænding der benyttes (se figur 4.7).

Når momentet er lavere end ca. 60 – 65 % af det nominelle moment er billedet omvendt. Her medfører for en høj spænding et forøget tab og dermed lavere virkningsgrad.

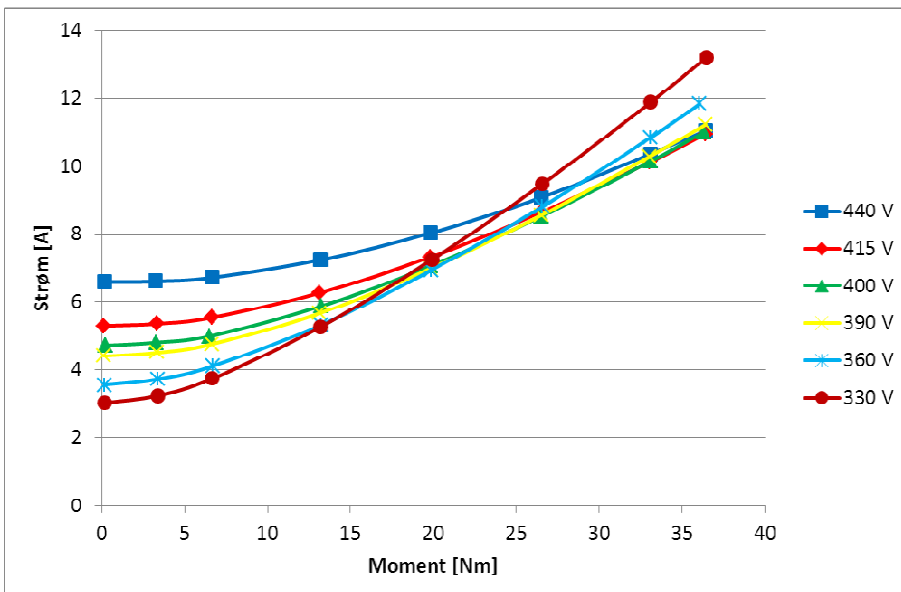


Figur 4.6. Virkningsgrader for Loher 4-polet 5 kW motor (fra 1978) ved forskellige spændinger som funktion af momentet

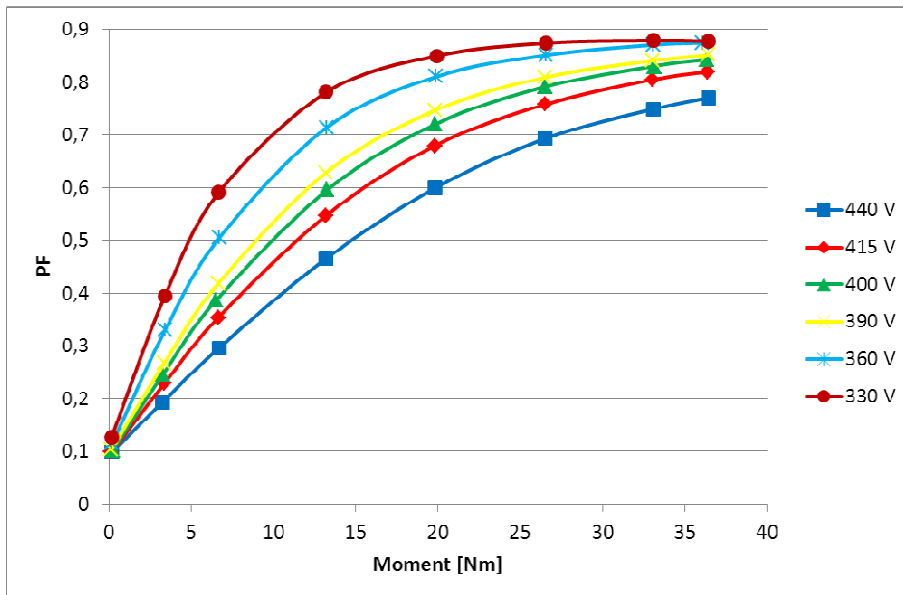


Figur 4.7. Motortab for Loher 4-polet 5 kW motor (fra 1978) ved forskellige spændinger som funktion af momentet

I figur 4.8 og 4.9 ses, ved forskellige spændinger, strøm og effektfaktor for motoren som funktion af momentet. Strømmen er højest ved lave spændinger, når momentet er højere end ca. 60 – 65 % af det nominelle moment. Effektfaktoren er højest ved lave spændinger ved alle momenter.

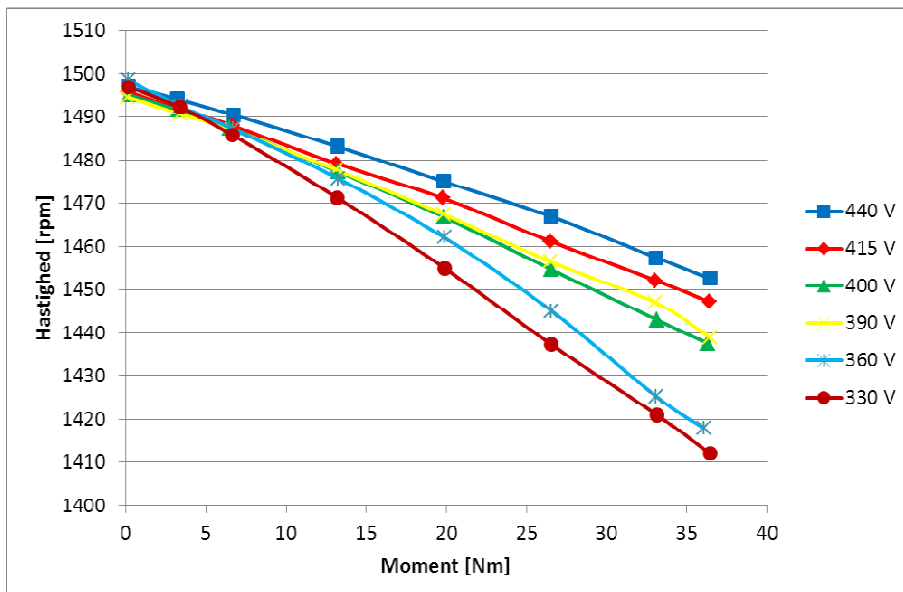


Figur 4.8. Strøm for Loher 4-polet 5 kW motor (fra 1978) ved forskellige spændinger som funktion af momentet



Figur 4.9. Effektfaktor (PF) for Loher 4-polet 5 kW motor (fra 1978) ved forskellige spændinger som funktion af momentet

I figur 4.10 ses omdrejningstal for motoren ved forskellige spændinger som funktion af momentet. Omdrejningstallet afhænger som det ses af momentet og spændingen. De største afvigelser mellem omdrejningstallene ses ved højere momenter. Ved ca. 37 Nm ses en forskel på ca. 40 rpm (mellem 440 V og 330 V).



Figur 4.10. Omdrejningstal for Loher 4-polet 5 kW motor (fra 1978) ved forskellige spændinger som funktion af momentet

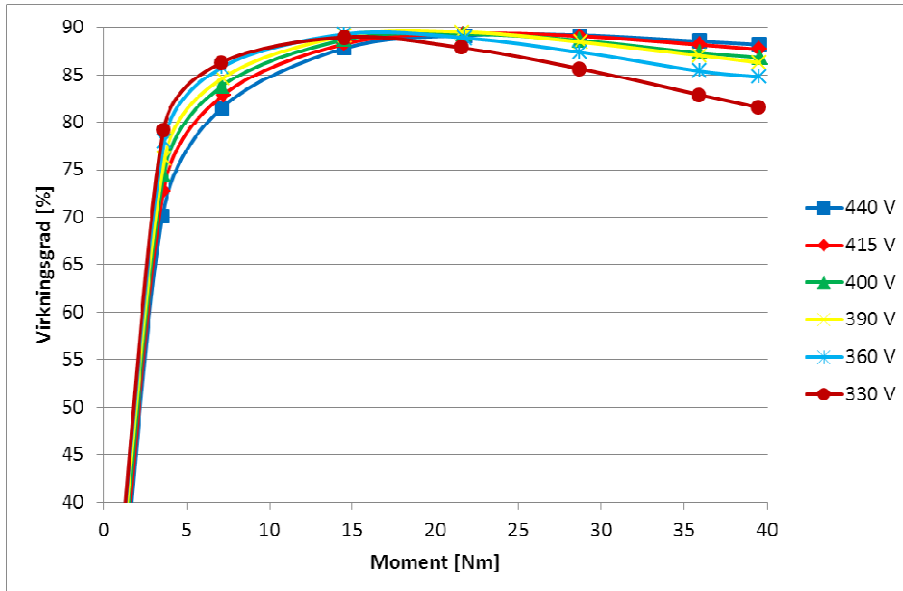
### 4.3 ABB 4-polet 5,5 kW EFF1 motor

I figur 4.11 ses, ved forskellige spændinger, virkningsgrader for en 4-polet 5,5 kW net tilsluttet EFF1 motor som funktion af momentet. Motorens nominelle omdrejningstal er 1.460 rpm og det nominelle moment er ca. 36 Nm.

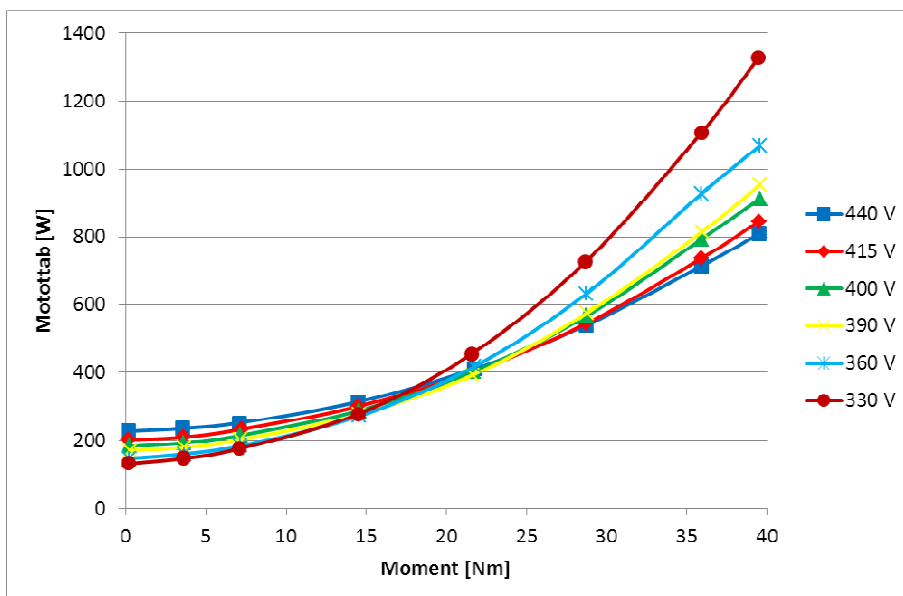
Virkningsgraden er højest ved høje spændinger, når momentet er højere end ca. 50 % af det nominelle moment. Ved nominelt moment er der ca. 7 % forskel mellem virkningsgraderne ved

henholdsvis 440 V og 330 V. Tabene i motoren stiger således jo højere moment og lavere spænding der benyttes (se figur 4.12).

Når momentet er lavere end ca. 50 % af det nominelle moment er billedet omvendt. Her medfører for en høj spænding et forøget tab og dermed lavere virkningsgrad.



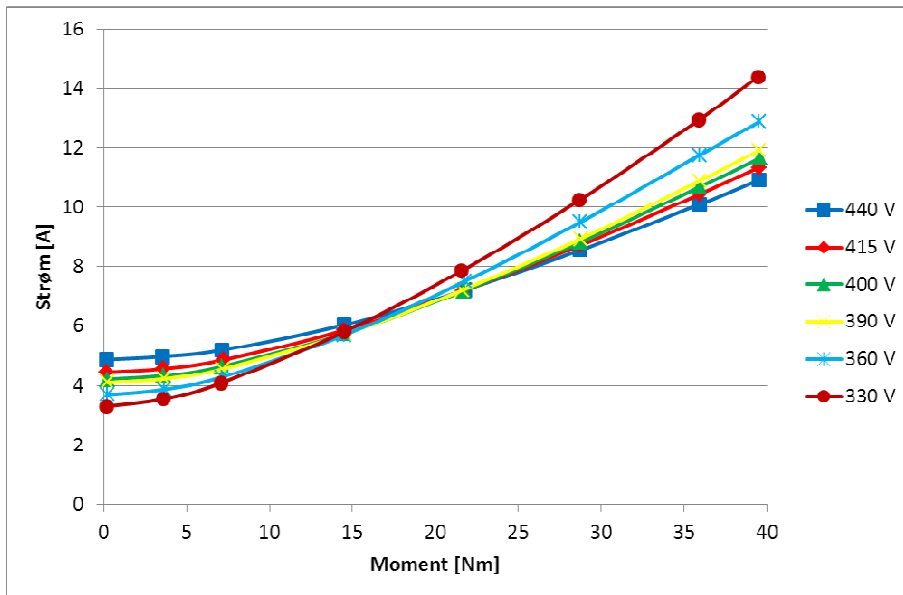
Figur 4.11. Virkningsgrader for ABB 4-polet 5,5 kW EFF1 motor ved forskellige spændinger som funktion af momentet



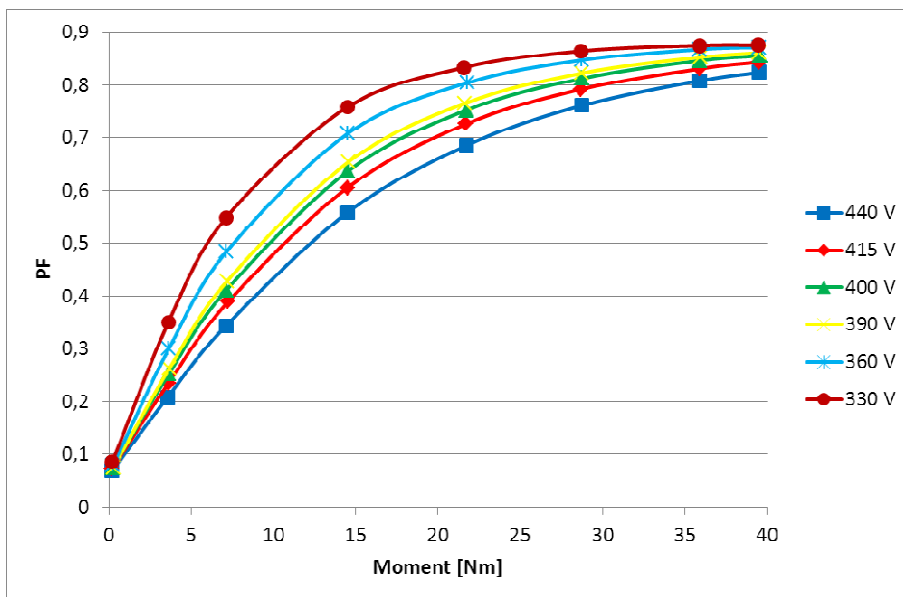
Figur 4.12. Motortab for ABB 4-polet 5,5 kW EFF1 motor ved forskellige spændinger som funktion af momentet

I figur 4.13 og 4.14 ses, ved forskellige spændinger, strøm og effektfaktor for motoren som funktion af momentet. Strømmen er højest ved lave spændinger, når momentet er højere end ca. 50 % af det nominelle moment. Effektfaktoren er højest ved lave spændinger ved alle momenter.



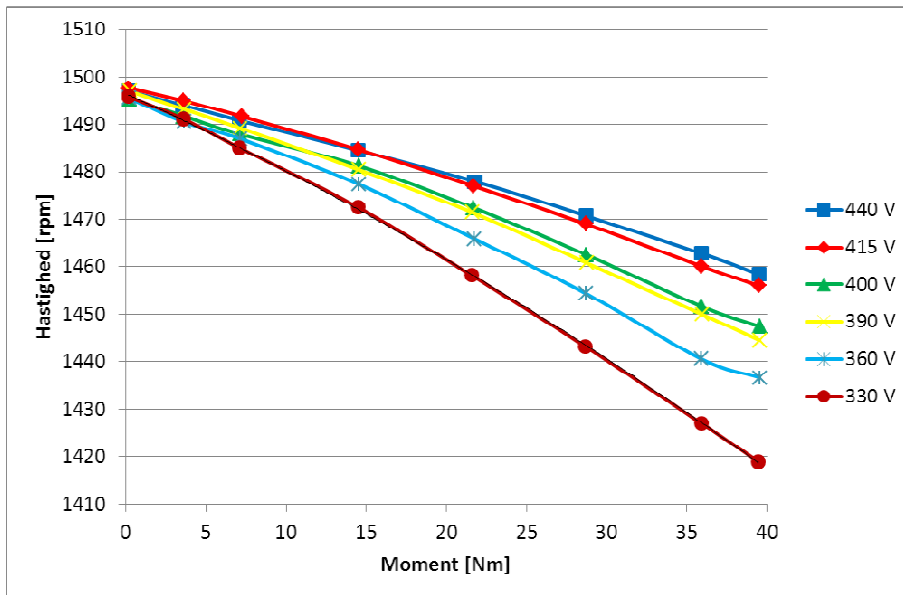


Figur 4.13. Strøm for ABB 4-polet 5,5 kW EFF1 motor ved forskellige spændinger som funktion af momentet



Figur 4.14. Effektfaktor (PF) for Loher 4-polet 5,5 kW EFF1 motor ved forskellige spændinger som funktion af momentet

I figur 4.15 ses omdrejningstal for motoren ved forskellige spændinger som funktion af momentet. Omdrejningstallet afhænger som det ses af momentet og spændingen. De største afvigelser mellem omdrejningstallene ses ved højere momenter. Ved ca. 40 Nm ses en forskel på ca. 40 rpm (mellem 440 V og 330 V).



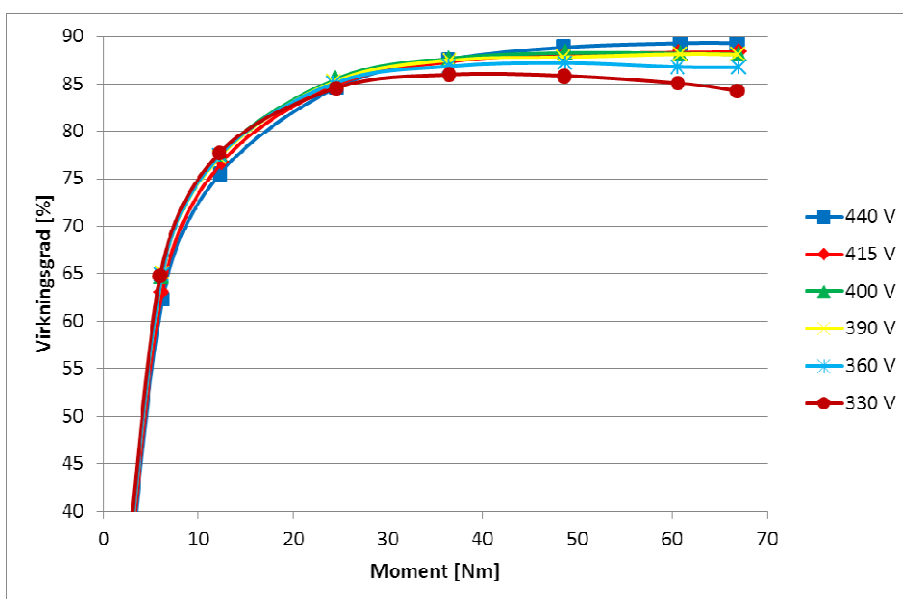
Figur 4.15. Omdrejningstal for Loher 4-polet 5,5 kW EFF1 motor ved forskellige spændinger som funktion af momentet

#### 4.4 BBC 2-polet 18,5 kW motor

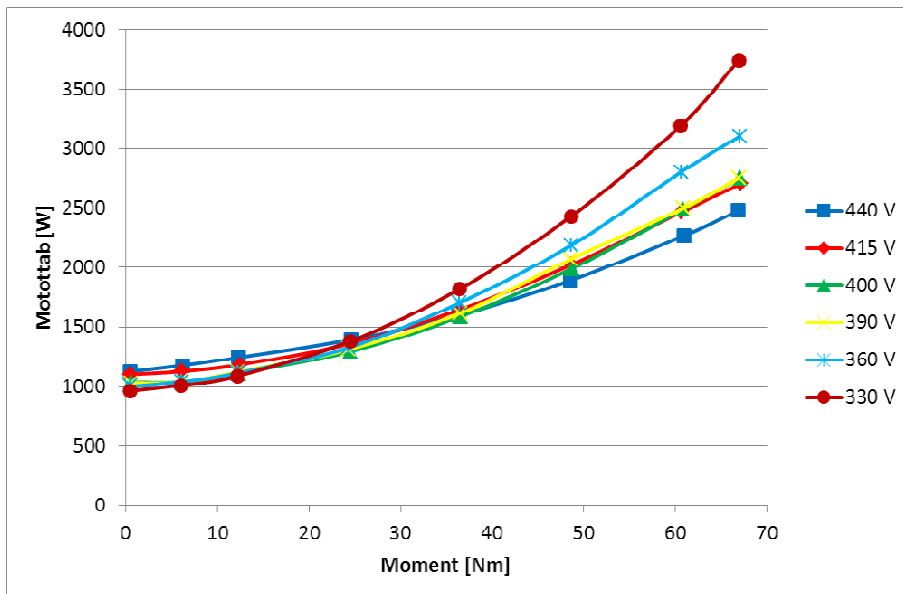
I figur 4.16 ses, ved forskellige spændinger, virkningsgrader for en 2-polet 18,5 kW net tilsluttet motor som funktion af momentet. Motorens nominelle omdrejningstal er 2.900 rpm og det nominelle moment er ca. 60 Nm.

Virkningsgraden er højest ved høje spændinger, når momentet er højere end ca. 40 - 45 % af det nominelle moment.. Tabene i motoren stiger således jo højere moment og lavere spænding der benyttes (se figur 4.17).

Når momentet er lavere end ca. 40 – 45 % af det nominelle moment er billedet omvendt. Her medfører for en høj spænding et forøget tab og dermed lavere virkningsgrad.

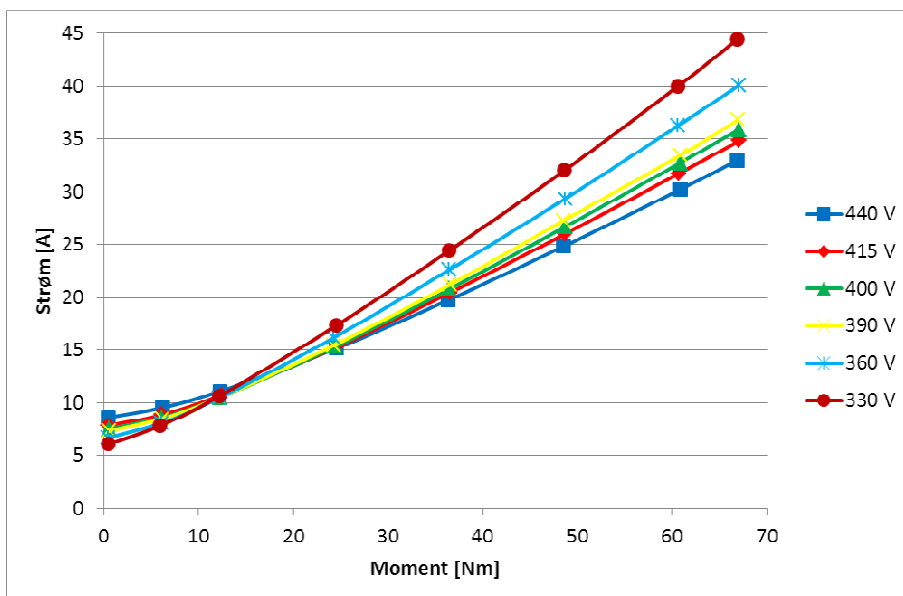


Figur 4.16. Virkningsgrader for BBC 2-polet 18,5 kW motor ved forskellige spændinger som funktion af momentet

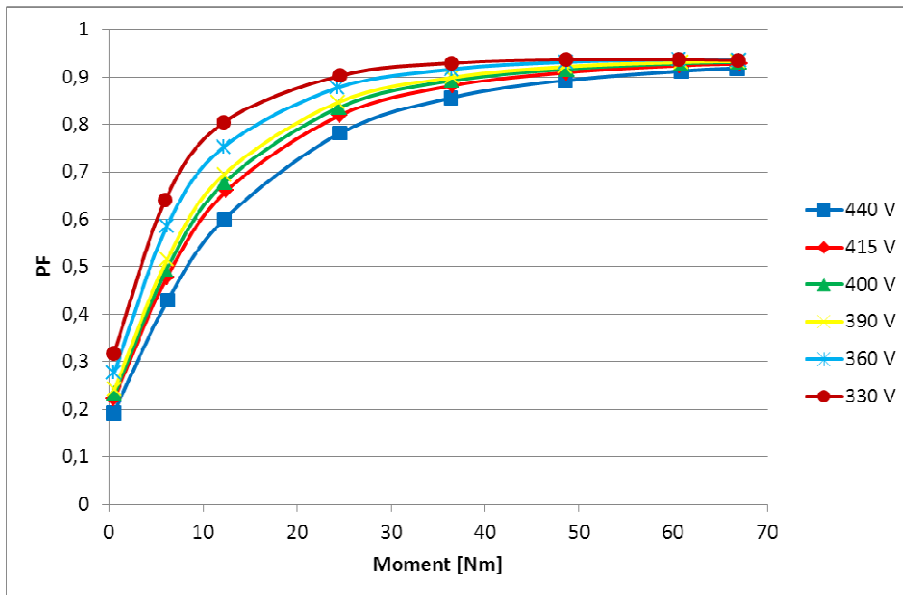


Figur 4.17. Motortab for BBC 2-polet 18,5 kW motor ved forskellige spændinger som funktion af momentet

I figur 4.18 og 4.19 ses, ved forskellige spændinger, strøm og effektfaktor for motoren som funktion af momentet. Strømmen er højest ved lave spændinger, når momentet er højere end ca. 40 – 45 % af det nominelle moment. Effektfaktoren er højest ved lave spændinger ved alle momenter.

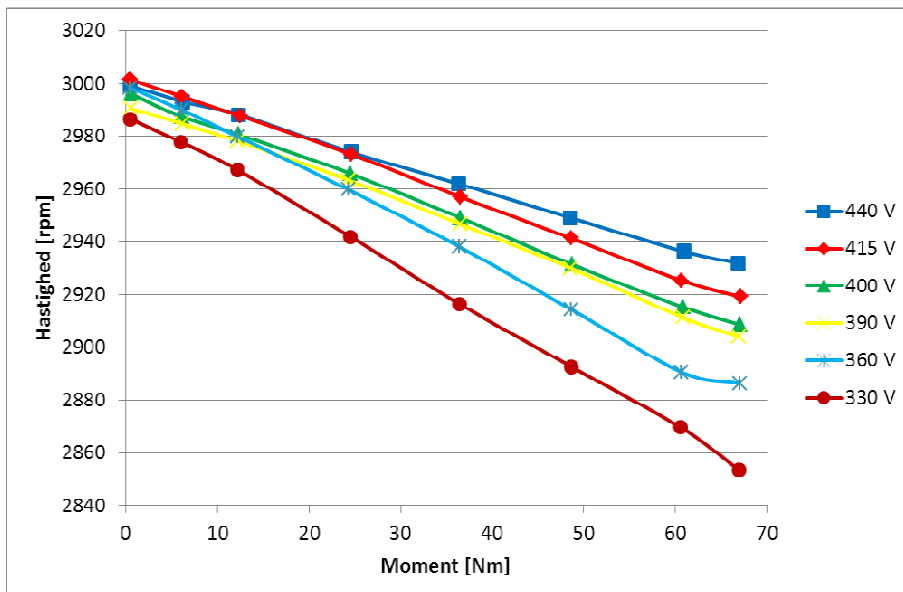


Figur 4.18. Strøm for BBC 2-polet 18,5 kW motor ved forskellige spændinger som funktion af momentet



Figur 4.19. Effektfaktor (PF) for BBC 2-polet 18,5 kW motor ved forskellige spændinger som funktion af momentet

I figur 4.20 ses omdrejningstal for motoren ved forskellige spændinger som funktion af momentet. Omdrejningstallet afhænger som det ses af momentet og spændingen. De største afvigelser mellem omdrejningstallene ses ved højere momenter. Ved ca. 67 Nm ses en forskel på ca. 80 rpm (mellem 440 V og 330 V).



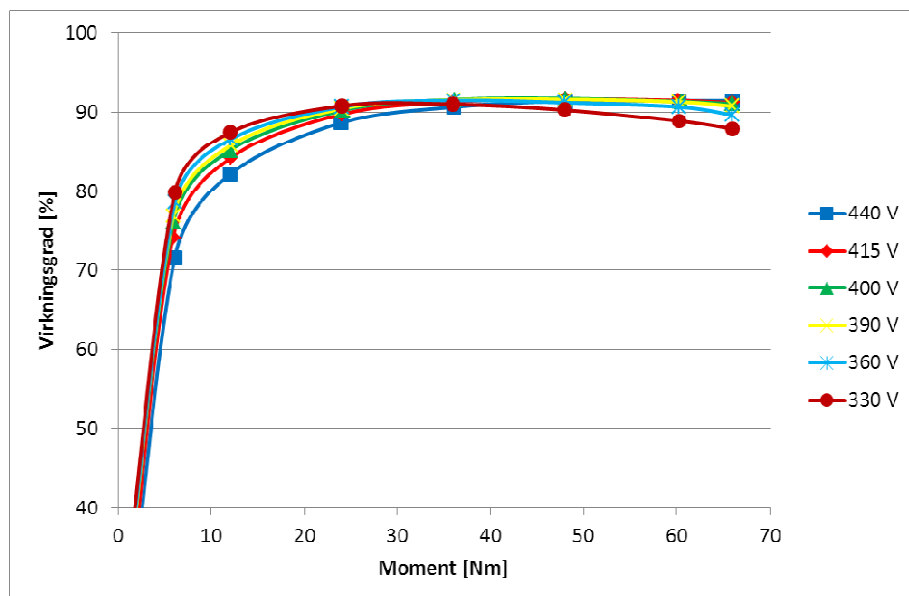
Figur 4.20. Omdrejningstal for en 2-polet 18,5 kW motor ved forskellige spændinger som funktion af momentet

#### 4.5 ABB 2-polet 18,5 kW EFF1 motor

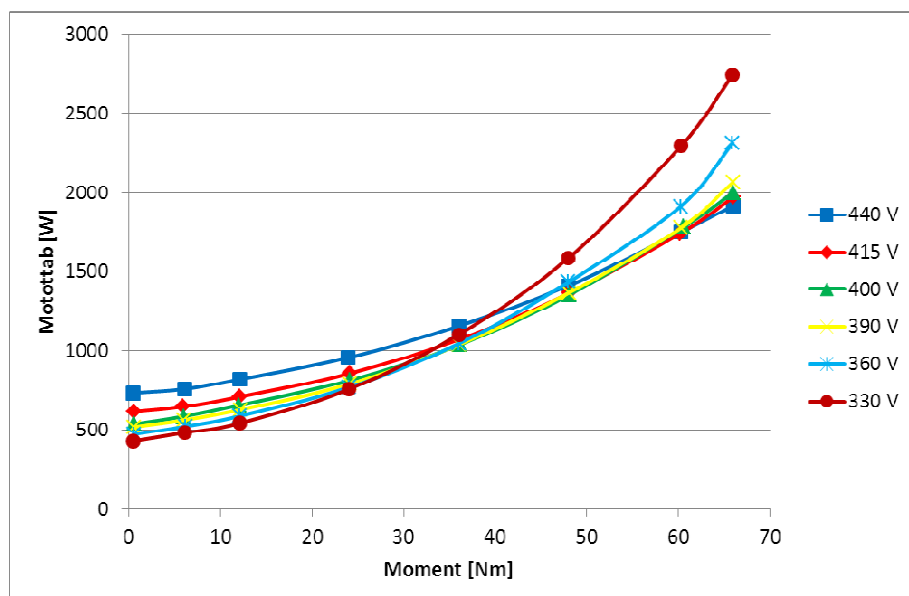
I figur 4.21 ses, ved forskellige spændinger, virkningsgrader for en 2-polet 18,5 kW EFF1 net tilsluttet motor som funktion af momentet. Motorens nominelle omdrejningstal er 2.936 rpm og det nominelle moment er ca. 60 Nm.

Virkningsgraden er højest ved høje spændinger, når momentet er højere end ca. 50 - 55 % af det nominelle moment.. Tabene i motoren stiger således jo højere moment og lavere spænding der benyttes (se figur 4.22).

Når momentet er lavere end ca. 50 – 55 % af det nominelle moment er billedet omvendt. Her medfører for en høj spænding et forøget tab og dermed lavere virkningsgrad.

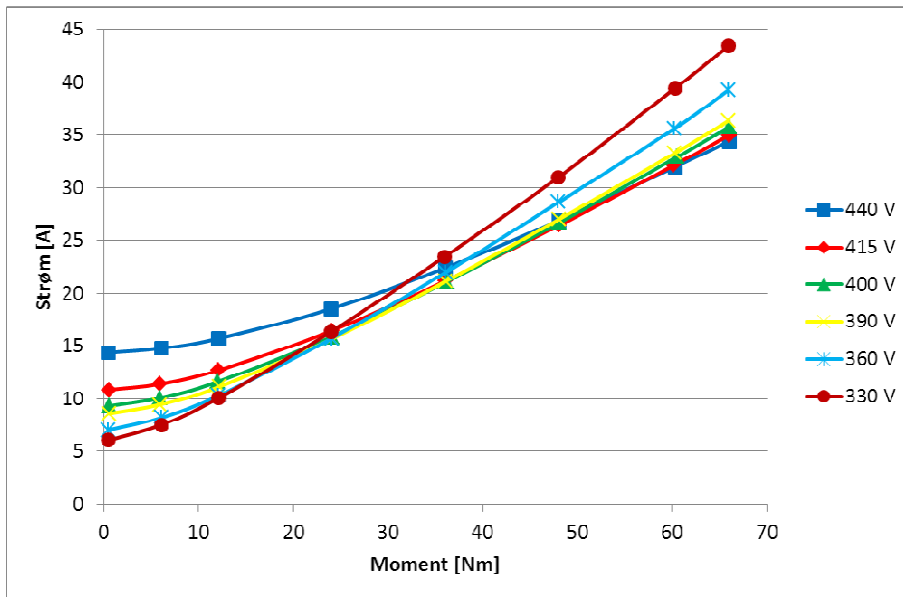


Figur 4.21. Virkningsgrader for ABB 2-polet 18,5 kW EFF1 motor ved forskellige spændinger som funktion af momentet

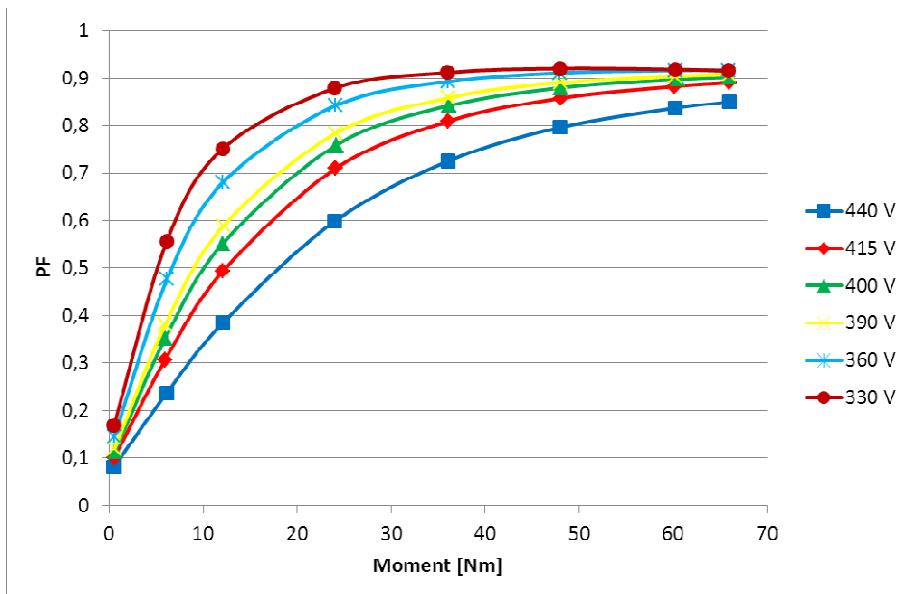


Figur 4.22. Motortab for ABB 2-polet 18,5 kW EFF1 motor ved forskellige spændinger som funktion af momentet

I figur 4.23 og 4.24 ses, ved forskellige spændinger, strøm og effektfaktor for motoren som funktion af momentet. Strømmen er højest ved lave spændinger, når momentet er højere end ca. 50 – 55 % af det nominelle moment. Effektfaktoren er højest ved lave spændinger ved alle momenter.



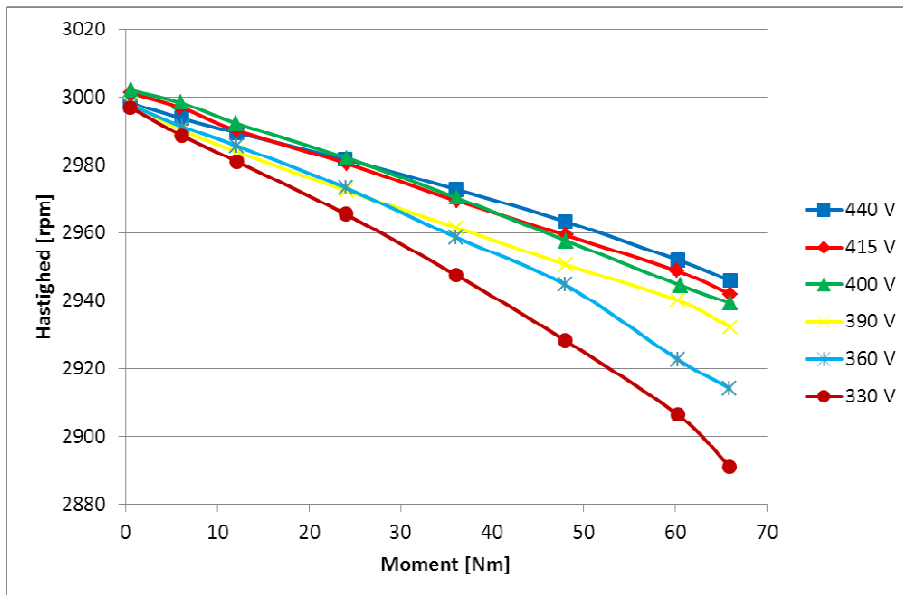
Figur 4.23. Strøm for ABB 2-polet 18,5 kW EFF1 motor ved forskellige spændinger som funktion af momentet



Figur 4.24. Effektfaktor (PF) for ABB 2-polet 18,5 kW EFF1 motor ved forskellige spændinger som funktion af momentet

I figur 4.25 ses omdrejningstal for motoren ved forskellige spændinger som funktion af momentet. Omdrejningstallet afhænger som det ses af momentet og spændingen. De største afvigelser mellem omdrejningstallene ses ved højere momenter. Ved ca. 66 Nm ses en forskel på ca. 60 rpm (mellem 440 V og 330 V).



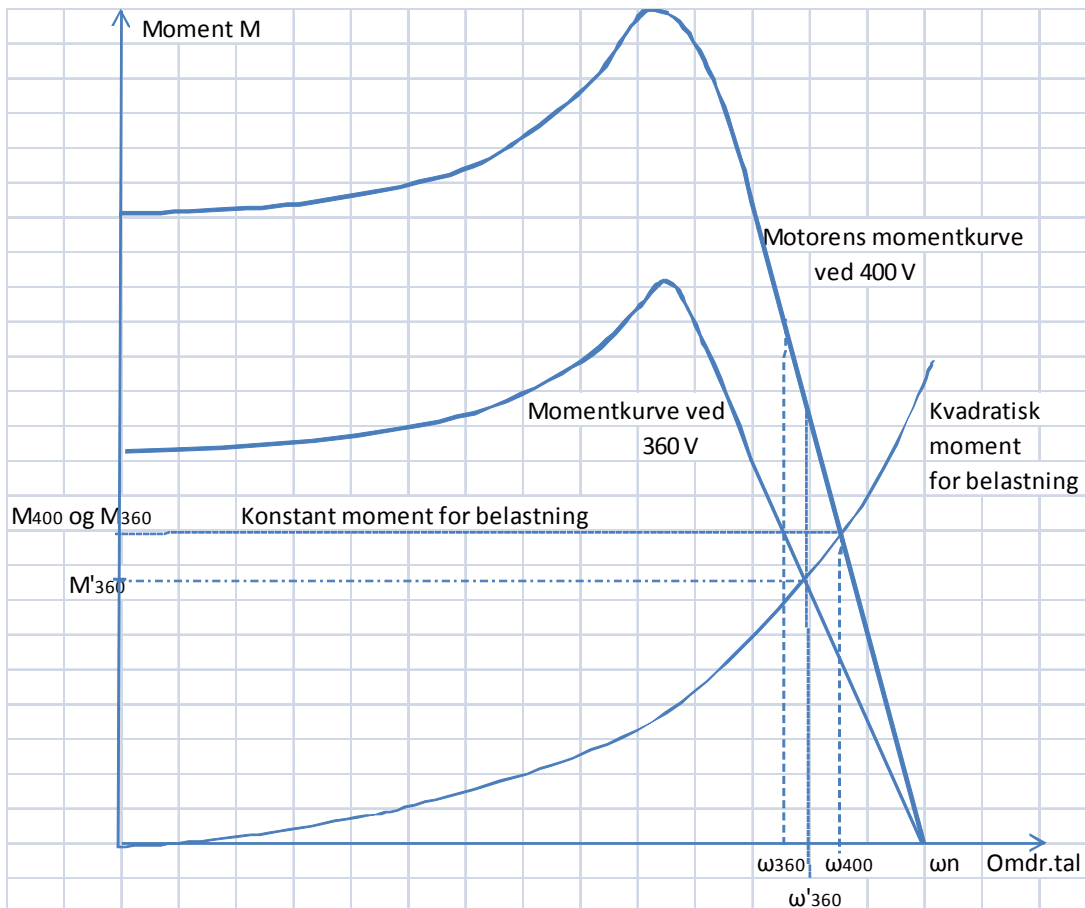


Figur 4.25. Omdrejningstal for ABB 2-polet 18,5 kW EFF1 motor ved forskellige spændinger som funktion af momentet

## 5 Vurdering af motorers optagne effekt og elforbrug ved forskellige spændinger

Ud fra laboratiormålingerne på de fem asynkronmotorer beregnes motorernes optagne effekt og elforbrug i belastningsområdet 0-100% ved en forsyningsspænding på 400 V og 360 V, således at ændringerne i optagen effekt og i elforbrug ved en 10% spændingssænkning kan vurderes. Beregningerne udføres for belastninger med konstant moment (f. eks. et løft) og med kvadratisk moment (f. eks. ventilator).

Laboratiormålingerne af omdrejningstallet korrigeres for de motorer, hvor det målte omdrejningstal ved laveste belastning ikke er det samme ved 400 V som ved 360 V (de to omdrejningstal skal være ens og meget nær det synkrone omdrejningstal  $\omega_n$ ).



Figur 5.1 Skitse af asynkronmotors momenter og omdrejningstal ved to forskellige spændinger

Ved kvadratisk moment beregnes momentet ved 360 V  $M'_{360}$  til (se også figur 5.1):

$$M'_{360} = M_{400} \cdot (\omega'_{360}/\omega_{400})^2$$

Idet momentkurven er tilnærmelsesvis lineær i arbejdsområdet og idet  $\omega_{360}$  er omdrejningstallet ved 360 V og konstant moment ( $M_{360} = M_{400}$ ) bliver:

$$\omega_n - \omega'_{360} = (\omega_n - \omega_{360}) \cdot M'_{360}/M_{400}$$

$\omega'_{360}$  bestemmes således ved iteration.

Tabellerne 5.1-5.5 viser beregningerne af motorernes optagne effekt ved 360 og 400 V og ved konstant samt kvadratisk moment. Der er også beregnet et energiforbrug under den forudsætning, at motoren skal løse en bestemt opgave som at løfte en elevator en bestemt højde eller ventilere en bestemt luftmængde. I de nævnte situationer er ydelsen (hejsehastighed, luftmængde pr. sekund) proportional med omdrejningstallet, og motorens driftstid bliver opvendt proportional med omdrejningstallet.

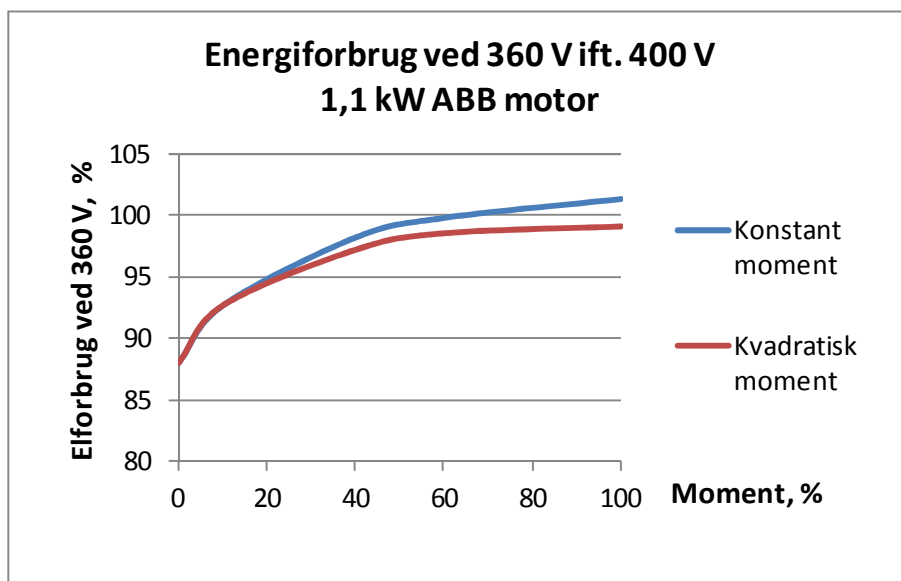
Figurene 5.1-5.5 viser det beregnede elforbrug ved den 10% lavere spænding. Elforbruget er lavere ved kvadratiske moment end ved konstant moment, fordi effekten ved kvadratisk moment følger omdrejningstallet i 3. potens, mens effekten ved lineært moment følger omdrejningstallet i 1. potens.

For BBC motoren på 18,5 kW er der meget lidt forskel på optagen effekt og elforbrug ved 400 V og 360 V. For de andre motorer opnås en elbesparelse ved belastninger (momenter) under 40-70%, hvis belastningen har konstant moment, og for belastninger under 60% eller for alle belastninger ved kvadratisk moment.

Forskellen i effekt og energi ved to spændinger afhænger af den valgte referencespænding, I dette afsnit er 400 V (230 V fasespænding) valgt som reference, men var der valgt en højere referencespænding, ville forskellen have været større i det lave belastningsområde og mindre i det høje område (se de opmålte virkningsgradskurver i afsnit 4). Det modsatte er tilfældet, hvis der var valgt en referencespænding lavere end 400 V.

ABB	Akseleffekt før	% af nominal	100		60		40		10		0	
1,1 kW	Spænding	V	400	360	400	360	400	360	400	360	400	360
Konstant moment	Moment	Nm	7,23	7,23	4,35	4,35	2,84	2,84	0,72	0,72	0,26	0,26
	Omdrejningstal	o/min	1431	1416	1456	1447	1469	1460	1481	1479	1485	1485
	Akseleffekt	W	1.083	1.072	663	659	437	434	112	112	40	40
	Motortab	W	220	234	144	141	120	109	104	88	101	84
	Optagen effekt	W	1.303	1.306	807	800	557	543	216	200	141	124
		Relativt		100,0	100,2	100,0	99,1	100,0	97,5	100,0	92,5	100,0
	Energiforbrug	Relativt	100,0	101,3	100,0	99,7	100,0	98,1	100,0	92,6	100,0	88,0
Kvadratisk moment	Moment	Nm	7,23	7,09	4,35	4,29	2,84	2,81	0,72	0,72	0,26	0,26
	Omdrejningstal	o/min	1431	1417	1456	1448	1469	1460	1481	1479	1485	1485
	Akseleffekt	W	1.083	1.052	663	651	437	430	112	112	40	40
	Motortab	W	220	226	144	140	120	108	104	88	101	84
	Optagen effekt	W	1.303	1.278	807	791	557	538	216	200	141	124
		Relativt		100,0	98,1	100,0	97,9	100,0	96,5	100,0	92,5	100,0
	Energiforbrug	Relativt	100,0	99,0	100,0	98,5	100,0	97,1	100,0	92,6	100,0	88,0

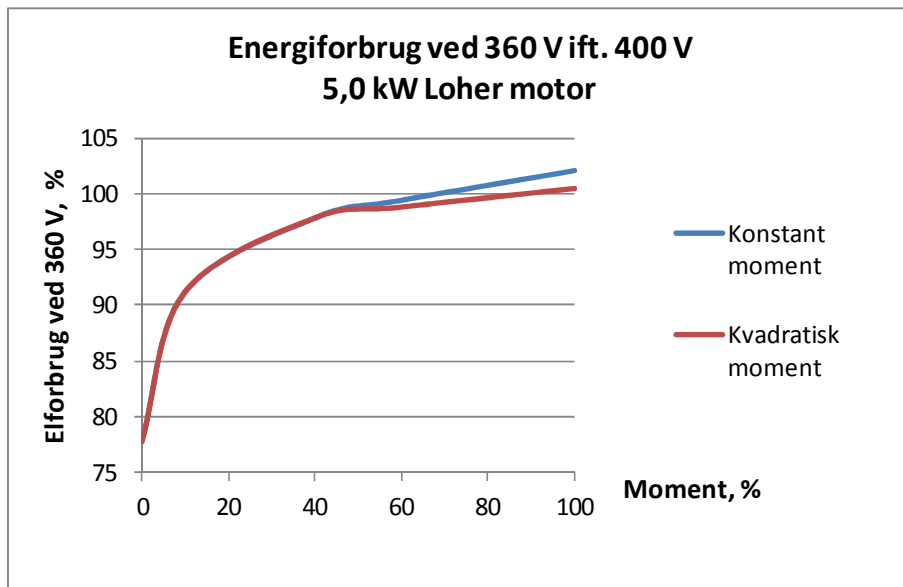
Tabel 5.1 Optagen effekt og elforbrug for ABB 1,1 kW asynkronmotor



Figur 5.1 Elforbrug ved 360 V ift. elforbruget ved 400V til løsning af konkret opgave

Loher	Akseleffekt før	% af nominal	100		60		40		10		0	
5,0 kW	Spænding	V	400	360	400	360	400	360	400	360	400	360
Konstant moment	Moment	Nm	33,1	33,1	19,8	19,8	13,2	13,2	3,3	3,3	0,2	0,2
	Omdrejningstal	o/min	1443	1431	1467	1459	1477	1472	1492	1489	1495	1495
	Akseleffekt	W	5.002	4.960	3.042	3.025	2.042	2.035	516	515	31	31
	Motortab	W	843	958	484	462	380	327	308	235	302	228
	Optagen effekt	W	5.845	5.918	3.526	3.487	2.422	2.362	824	750	333	259
		Relativt		100,0	101,3	100,0	98,9	100,0	97,5	100,0	91,0	100,0
	Energiforbrug	Relativt	100,0	102,1	100,0	99,4	100,0	97,9	100,0	91,2	100,0	77,8
Kvadratisk moment	Moment	Nm	33,1	32,6	19,8	19,7	13,2	13,2	3,3	3,3	0,2	0,2
	Omdrejningstal	o/min	1443	1432	1467	1458	1477	1472	1492	1489	1495	1495
	Akseleffekt	W	5.002	4.889	3.042	3.008	2.042	2.035	516	515	31	31
	Motortab	W	843	938	484	454	380	326	308	235	302	228
	Optagen effekt	W	5.845	5.827	3.526	3.462	2.422	2.361	824	750	333	259
		Relativt		100,0	99,7	100,0	98,2	100,0	97,5	100,0	91,0	100,0
	Energiforbrug	Relativt	100,0	100,5	100,0	98,8	100,0	97,8	100,0	91,2	100,0	77,8

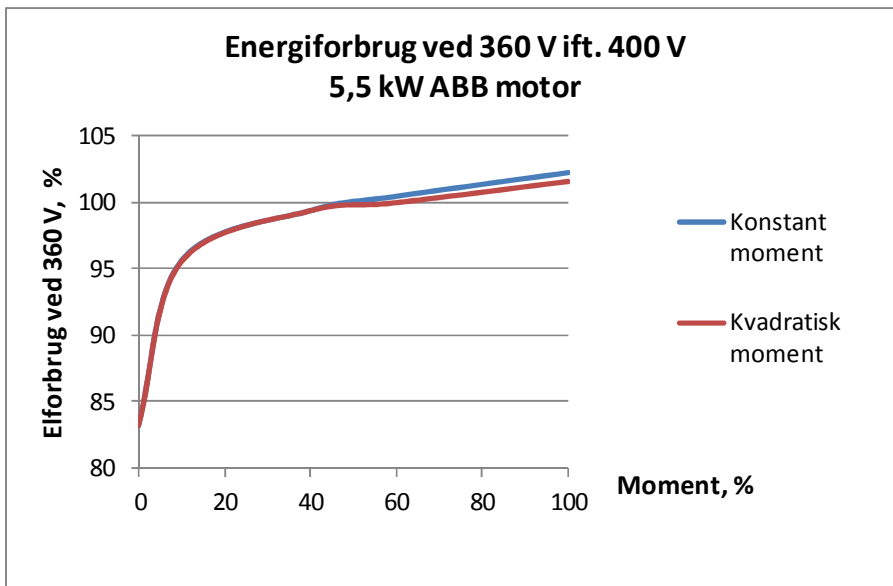
Tabel 5.2 Optagen effekt og elforbrug for Loher 5,0 kW asynkronmotor



Figur 5.2 Elforbrug ved 360 V ift. elforbruget ved 400V til løsning af konkret opgave

ABB	Akseleffekt før	% af nominal	100		60		40		10		0	
5,5 kW	Spænding	V	400	360	400	360	400	360	400	360	400	360
Konstant moment	Moment	Nm	35,9	35,9	21,7	21,7	14,5	14,5	3,6	3,6	0,2	0,2
	Omdrejningstal	o/min	1452	1441	1472	1466	1481	1477	1492	1491	1495	1495
	Akseleffekt	W	5.459	5.417	3.345	3.331	2.249	2.243	562	562	31	31
	Motortab	W	794	928	403	419	287	271	193	160	183	147
	Optagen effekt	W	6.253	6.345	3.748	3.750	2.536	2.514	755	722	214	178
		Relativt		100,0	101,5	100,0	100,1	100,0	99,1	100,0	95,6	100,0
	Energiforbrug	Relativt	100,0	102,3	100,0	100,5	100,0	99,4	100,0	95,6	100,0	83,2
Kvadratisk moment	Moment	Nm	35,9	35,7	21,7	21,6	14,5	14,5	3,6	3,6	0,2	0,2
	Omdrejningstal	o/min	1452	1442	1472	1466	1481	1477	1492	1491	1495	1495
	Akseleffekt	W	5.459	5.391	3.345	3.316	2.249	2.243	562	562	31	31
	Motortab	W	794	913	403	414	287	269	193	159	183	147
	Optagen effekt	W	6.253	6.304	3.748	3.730	2.536	2.512	755	721	214	178
		Relativt		100,0	100,8	100,0	99,5	100,0	99,1	100,0	95,4	100,0
	Energiforbrug	Relativt	100,0	101,5	100,0	99,9	100,0	99,3	100,0	95,5	100,0	83,2

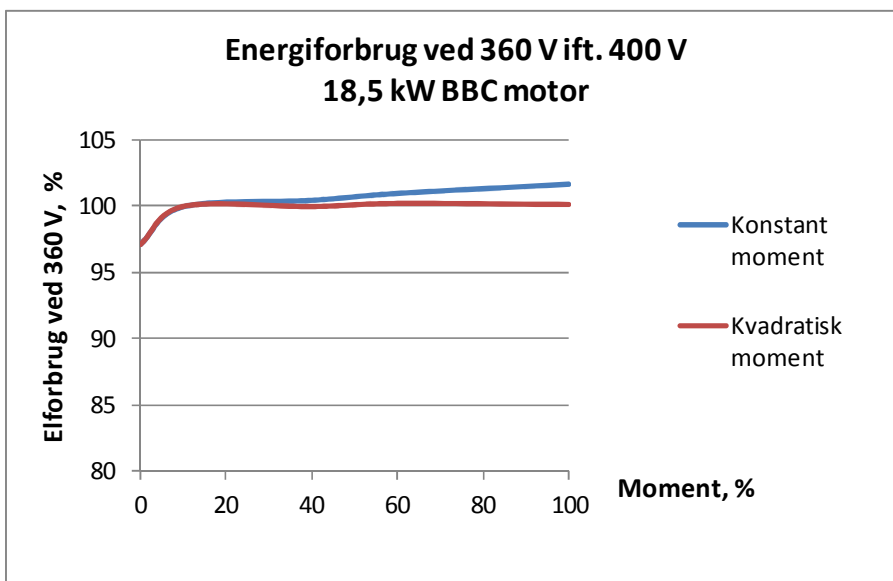
Tabel 5.3 Optagen effekt og elforbrug for ABB 5,5 kW asynkronmotor



Figur 5.3 Elforbrug ved 360 V ift. elforbruget ved 400V til løsning af konkret opgave

BBC		% af nomi	100		60		40		10		0	
18,5 kW		Spænding	400	360	400	360	400	360	400	360	400	360
Konstant moment	Moment	Nm	60,86	60,86	36,49	36,49	24,49	24,49	6,08	6,08	0,6	0,6
	Omdrejningstal	o/min	2917	2891	2951	2938	2968	2960	2990	2990	2998	2998
	Akseleffekt	W	18.591	18.425	11.276	11.227	7.612	7.591	1.904	1.904	188	188
	Motortab	W	2.489	2.816	1.585	1.703	1.293	1.330	1.039	1.038	1.036	1.001
	Optagen effekt	W	21.080	21.241	12.861	12.930	8.905	8.921	2.943	2.942	1.224	1.189
	Energiforbrug	Relativt	100,0	100,8	100,0	100,5	100,0	100,2	100,0	100,0	100,0	97,1
Kvadratisk moment	Moment	Nm	60,86	59,86	36,49	36,19	24,49	24,36	6,08	6,08	0,6	0,6
	Omdrejningstal	o/min	2917	2893	2951	2939	2968	2960	2990	2990	2998	2998
	Akseleffekt	W	18.591	18.135	11.276	11.138	7.612	7.551	1.904	1.904	188	188
	Motortab	W	2.489	2.795	1.585	1.695	1.293	1.326	1.039	1.038	1.036	1.001
	Optagen effekt	W	21.080	20.930	12.861	12.833	8.905	8.877	2.943	2.942	1.224	1.189
	Energiforbrug	Relativt	100,0	99,3	100,0	99,8	100,0	99,7	100,0	100,0	100,0	97,1

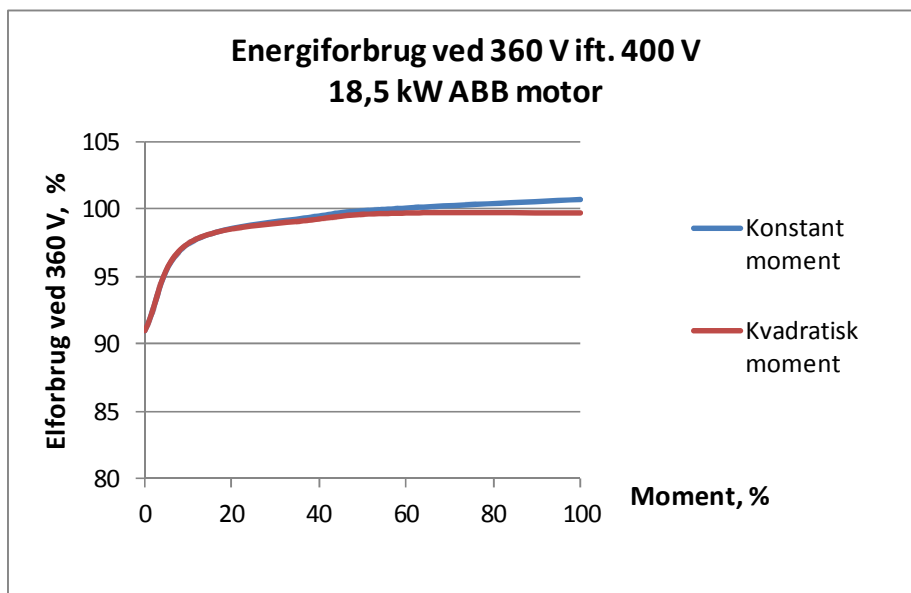
Tabel 5.4 Optagen effekt og elforbrug for BBC 18,5 kW asynkronmotor



Figur 5.4 Elforbrug ved 360 V ift. elforbruget ved 400V til løsning af konkret opgave

ABB 18,5 kW	Akseleffekt før Spænding	% af nominal V	100		60		40		10		0	
			400	360	400	360	400	360	400	360	400	360
Konstant moment	Moment	Nm	60,26	60,26	36,14	36,14	24,13	24,13	6,00	6,00	0,60	0,60
	Omdrejningstal	o/min	2940	2923	2966	2958	2978	2973	2994	2991	2997	2997
	Akseleffekt	W	18.553	18.445	11.225	11.195	7.525	7.512	1.881	1.879	188	188
	Motortab	W	1.770	1.912	1.038	1.048	814	772	585	521	538	472
	Optagen effekt	W	20.323	20.357	12.263	12.243	8.339	8.284	2.466	2.400	726	660
		Relativt		100,0	100,2	100,0	99,8	100,0	99,3	100,0	97,3	100,0
	Energiforbrug	Relativt	100,0	100,8	100,0	100,1	100,0	99,5	100,0	97,4	100,0	90,9
Kvadra- tisk moment	Moment	Nm	60,26	59,60	36,14	35,95	24,13	24,05	6,00	6,00	0,60	0,60
	Omdrejningstal	o/min	2940	2924	2966	2958	2978	2973	2994	2991	2997	2997
	Akseleffekt	W	18.553	18.250	11.225	11.136	7.525	7.488	1.881	1.879	188	188
	Motortab	W	1.770	1.890	1.038	1.043	814	770	585	520	538	472
	Optagen effekt	W	20.323	20.140	12.263	12.179	8.339	8.258	2.466	2.399	726	660
		Relativt		100,0	99,1	100,0	99,3	100,0	99,0	100,0	97,3	100,0
	Energiforbrug	Relativt	100,0	99,6	100,0	99,6	100,0	99,2	100,0	97,4	100,0	90,9

Tabel 5.5 Optagen effekt og elforbrug for ABB 18,5 kW asynkronmotor



Figur 5.5 Elforbrug ved 360 V ift. elforbruget ved 400V til løsning af konkret opgave

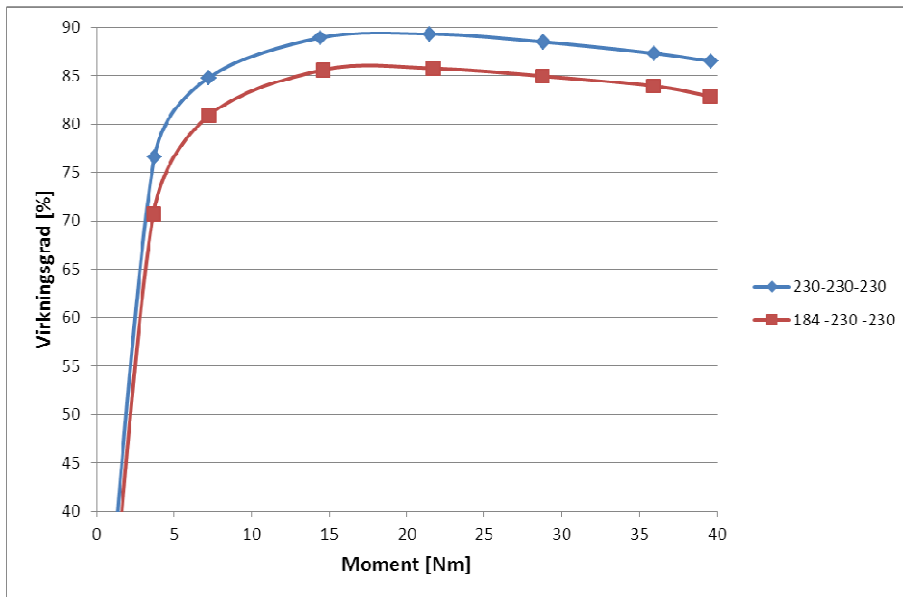
## 6 Måleresultater ved usymmetrisk spænding

### 6.1 ABB 4-polet 5,5 kW EFF1 motor

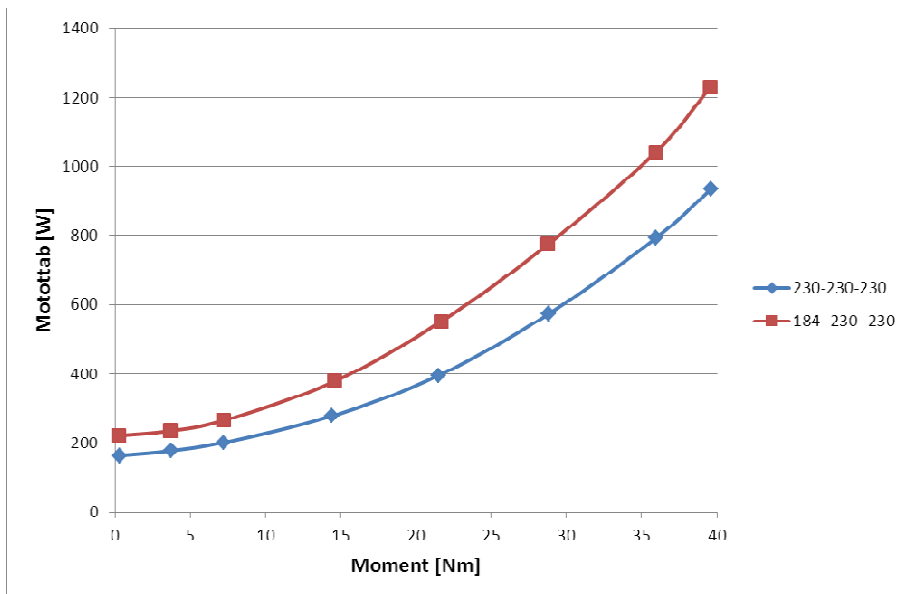
I figur 6.1 ses, ved henholdsvis symmetrisk og usymmetrisk spænding, virkningsgrader for en 4-polet 5,5 kW net tilsluttet EFF1 motor som funktion af momentet. Ved symmetrisk spænding er spændingen, som det ses i figuren, 230 V på hver fase. Ved usymmetrisk spænding er spændingen 20 % lavere på L1-fasen, svarende til 184 V.

Virkningsgraden er i hele momentområdet højest ved symmetrisk spænding. Ved nominelt moment er der ca. 3 % forskel mellem virkningsgraderne ved henholdsvis symmetrisk og usymmetrisk spænding. Som det ses i figur 6.2 stiger tabene i motoren, jo højere moment der benyttes.



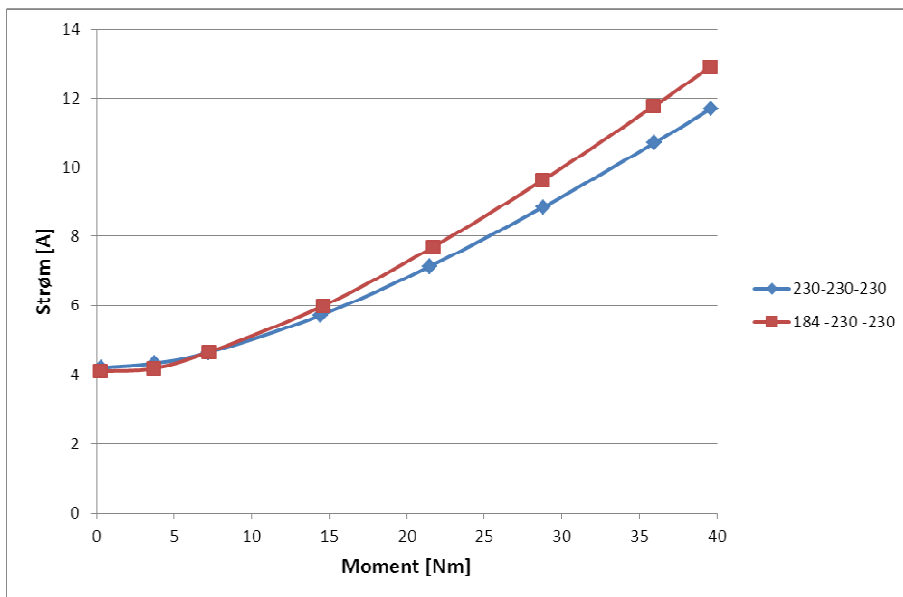


Figur 6.1. Virkningsgrader for ABB 4-polet 5,5 kW EFF1 motor ved symmetrisk og usymmetrisk spænding som funktion af momentet

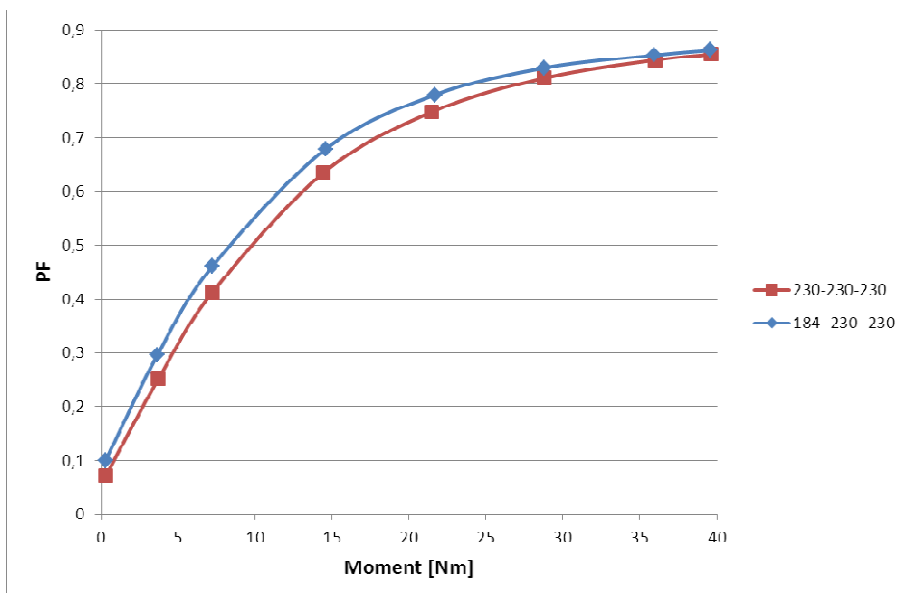


Figur 6.2. Motortab for ABB 4-polet 5,5 kW EFF1 motor ved symmetrisk og usymmetrisk spænding som funktion af momentet

I figur 6.3 og 6.4 ses, ved forskellige spændinger, strøm og effektfaktor for motoren som funktion af momentet. Når momentet bliver højere end ca. 20 % af det nominelle moment, bliver strømmen ved usymmetrisk spænding højere end ved symmetrisk spænding. Effektfaktoren er højest ved usymmetrisk spænding ved alle momenter.

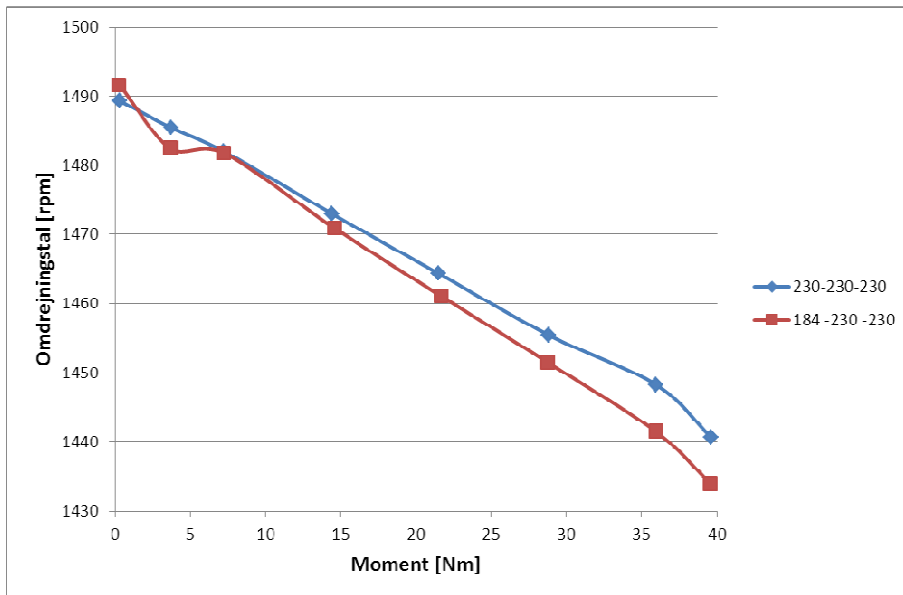


Figur 6.3. Strøm for ABB 4-polet 5,5 kW EFF1 motor ved symmetrisk og usymmetrisk spænding som funktion af momentet



Figur 6.4. Effektfaktor (PF) for ABB 4-polet 5,5 kW EFF1 motor ved symmetrisk og usymmetrisk spænding som funktion af momentet

I figur 6.5 ses omdrejningstal for motoren ved henholdsvis symmetrisk og usymmetrisk spænding som funktion af momentet. Når momentet bliver højere end ca. 20 % af det nominelle moment, bliver omdrejningstallet ved usymmetrisk spænding en smule lavere end ved symmetrisk spænding.



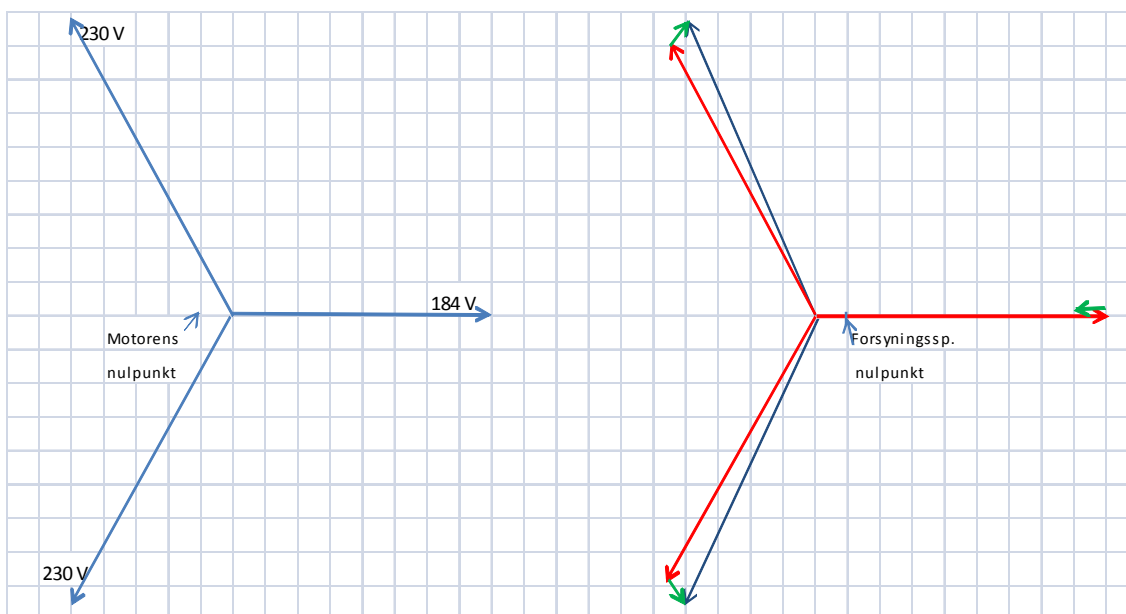
Figur 6.5. Omdrejningstal for ABB 4-polet 5,5 kW EFF1 motor ved symmetrisk og usymmetrisk spænding som funktion af momentet

## 7 Vurdering af motorernes optagne effekt ved usymmetrisk spænding

### 7.1 Teoretisk beregning

I dette afsnit beregnes de ekstra tab i en asynkronmotor som følge af en påtrykt usymmetrisk spænding. Med reference til målingerne i afsnit 6 regnes på en spændingsforsyning, som er 230 V i fase b og c og 80% heraf (184 V) i fase a, se figur 7.1 til venstre. Asynkronmotoren vil danne et nulpunkt med spændingen -23 V. Motorspændingen i de tre faser bliver således

$$U_a = 207 \text{ V, vinkel } 0^\circ \quad U_b = 219,4 \text{ V, vinkel } 117,45^\circ \quad U_c = 219,4 \text{ V, vinkel } 242,55^\circ$$

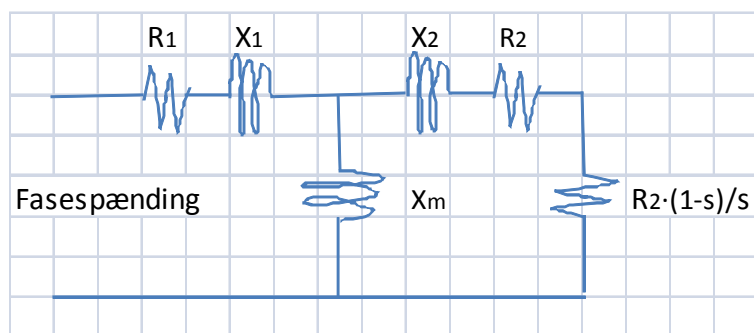


Figur 7.1. Usymmetrisk forsyningsspænding (tv.) og den resulterende spænding i asynkromotoren (th., blå), som kan opløses i en symmetrisk og en invers komponent (hhv. rød og grøn)

Man kan regne på den usymmetriske motorspænding ved at opløse denne i en symmetrisk og en invers spænding, se figur 7.1. Den symmetriske spænding bliver 215,3 V (yderspænding 373 V), den inverse 8,3 V. Motorens spændingsubalance, der er forholdet mellem den inverse og den symmetriske spænding, bliver 3,9%.

### 5,5 kW 4-polet ABB motor

For asynkronmotoren i afsnit 6 benyttes "det sædvanlige" ækvivalentdiagram, hvor tabene i  $R_2$  er rotortabene og tabene i  $R_2 \cdot (1-s)/s$  svarer til akseleffekten:



Figur 7.2. Ækvivalentdiagram for asynkronmotor, gældende pr. fase

Ifølge ABB er motorens data:

$$R_1 = 1,12 \text{ ohm/fase}$$

$$R_2 = 0,66 \text{ ohm/fase}$$

$$X_1 = 1,19 \text{ ohm/fase}$$

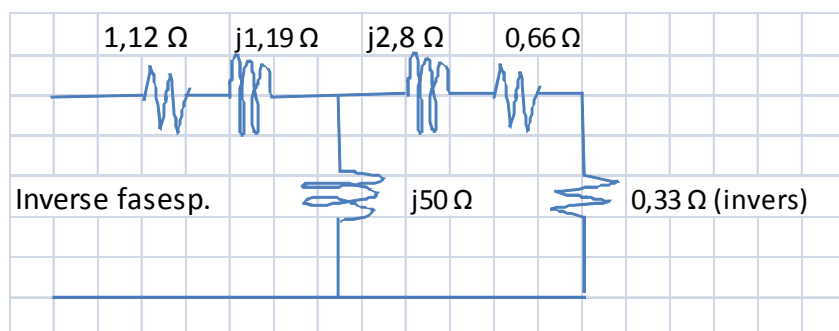
$$X_2 = 2,80 \text{ ohm/fase}$$

$$X_m = 50 \text{ ohm/fase}$$

s er 0,027 ved nominal belastning.

### Tabene i det inverse system

Ækvivalentskemaet for det inverse spændingssystem svarer til skemaet for det synkron, blot er rotorens hastighed i forhold til det inverse felt ikke s, men 2-s:



Figur 7.3. Ækvivalentskema for 5,5 kW asynkronmotorens inverse spænding

Den inverse fasestrøm bliver dermed omtrent:

$$I_{inv} = U_{inv} : ((R_1 + R_2/(2-s))^2 + (X_1 + X_2)^2)^{1/2} = 8,3 \text{ V} : ((1,12 + 0,66 + 0,33)^2 + (1,19 + 2,8)^2)^{1/2} = 1,84 \text{ A/fase.}$$

Strømvarmetabene som følge af den inverse fasestrøm bliver pr. fase  $(R_1 + R_2) \cdot I_{inv}^2 = 6,0 \text{ W}$ .

Hertil kommer modmomentet, beregnet som tabene i modstanden på  $0,33 \Omega$ , som pr. fase bliver 1,1 W. I alt bliver tabene som følge af den inverse spænding 21 W, hvoraf ca. 3 W er modmoment og resten er strømvarmetab.

### Konklusion på den teoretiske beregning

Påtrykkes en asynkronmotor en usymmetrisk spænding, der er 100% i to faser og 80% i den tredje, vil motorens fasespænding blive 90%, 95% og 95%. De to sidstnævnte spændinger vil være drejet  $+117,45^\circ$  og  $-117,45^\circ$ .

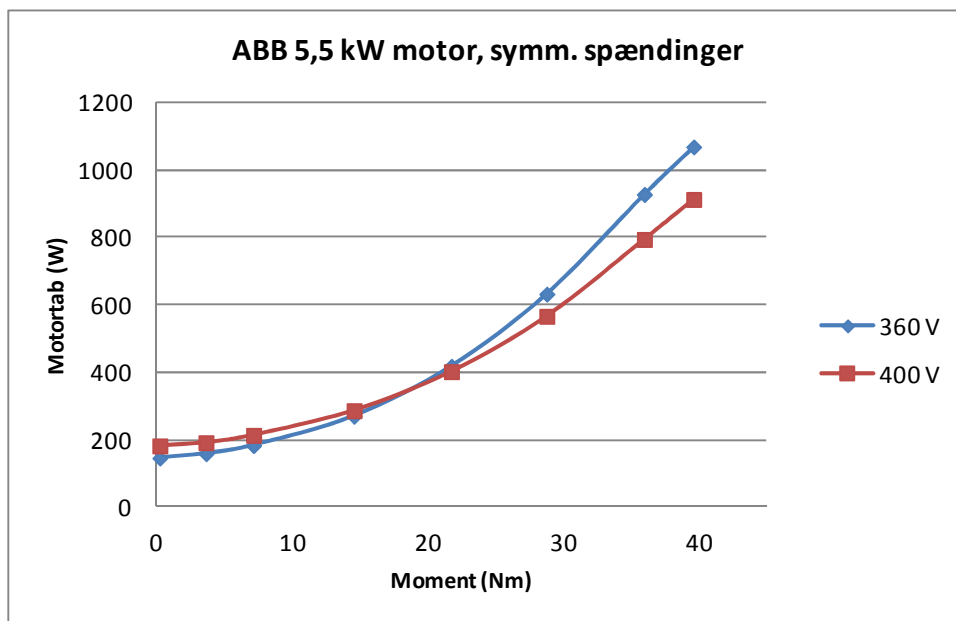
Motoren vil reagere, som om den blev påtrykt kombinationen af:

- en synkron spænding på 93,6%, som – set i forhold til 100% spænding - vil betyde procentuelt lidt større tab ved større momenter og lidt mindre ved lavere (for ABB motoren er skillelinien ca. 50% moment, se figur 4.11)
- en invers spænding på 3,6%, som vil øge motortabene med ca. 0,4% af mærkeeffekten. Denne forøgelse er praktisk tabet uafhængig af motorens belastning

Motoren kan ikke belastes 100%, men derates ifølge litteraturen til ca. 83% af mærkeeffekten på 5,5 kW.

## 7.2 Vurdering af målingerne i afsnit 6

Målingerne af motortabene ved den påførte usymmetriske spænding er vist i figur 6.2. Tabene er større ved den usymmetriske spænding end ved den symmetriske. Forskellen er fra 58 W ved tomgang til 295 W ved 110% last.



Figur 7.4. Målte tab i 5,5 kW asynkronmotor ved 360 og 400 V symmetriske spændinger

Til sammenligning er i figur 7.4 vist tabene ved symmetriske spændinger på 231 V (yderspænding 400 V) og 90% heraf. Ved tomgang er tabene 36 W lavere ved 360 V end ved 400 V, mens de er 156 W højere ved 110% last. Ud fra dette kan figur 6.2 tolkes således, at de ekstra tab ved den usymmetriske spænding er resultatet af motorens synkrone spænding på ca. 215 V (93,6%) samt den inverse spænding, som må tillægges tab fra ca. 80 W ved tomgang til ca. 200 W ved 110% last.

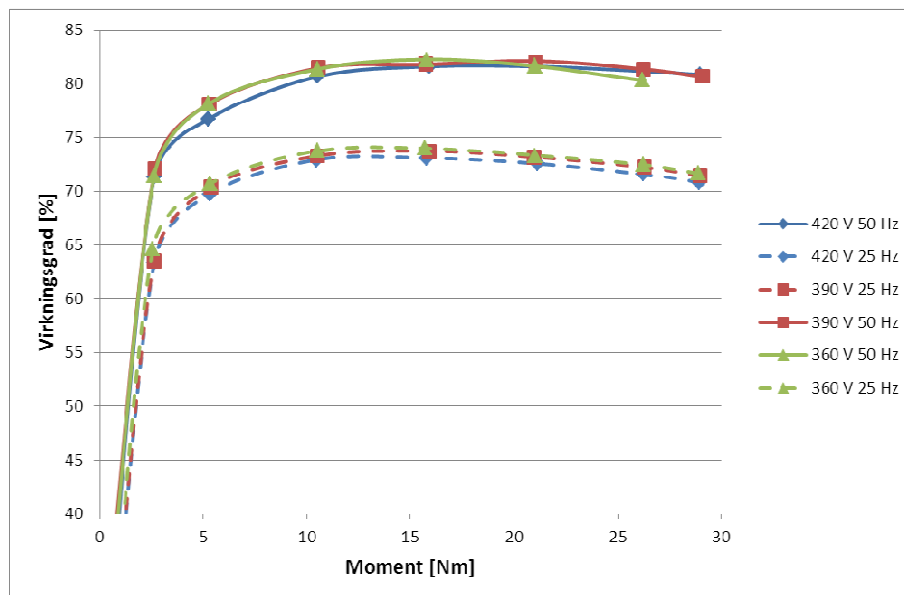
Måleresultaterne passer ikke med de teoretiske overvejelser, idet de ekstra tab som følge af de inverse strømme og den lavere synkrone spænding beregnes til en størrelsesorden mindre, end der er fundet ved målingerne. De detaljerede målinger af motorens fasestrømme viser, at de er indbyrdes meget forskellige, hvor man ellers ville forvente, at de var ens i de to faser med spændingen 230 V. Det ser derfor ud til, at spændingen på 80% ikke blot er reduceret, men også er drejet, og at usymmetrien dermed har været endnu større end de 3,9%, der er opgjort foran.

## 8 Måleresultater for motor med frekvensomformer

Målingerne er udført på en 4 kW Grundfos motor (virkningsgradsklasse eff1), der blev forsynet via en 4 kW frekvensomformer (Danfoss FC 100). Frekvensomformereren var indstillet til driftsformen ”Kompressor – energioptimal (AEO).

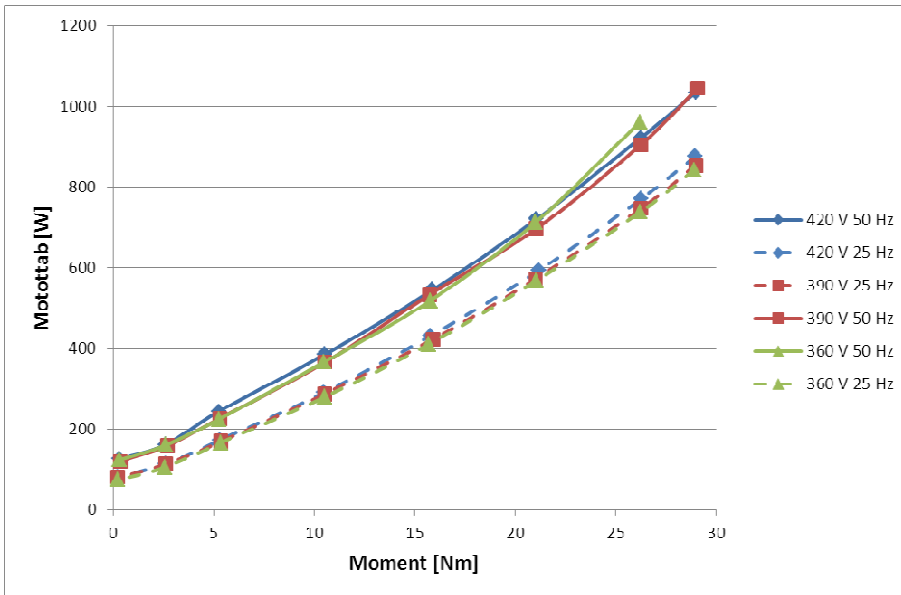
### 8.1 Grundfos 4-polet 4 kW motor – symmetrisk spænding

I figur 8.1 ses, ved forskellige spændinger og frekvenser, virkningsgrader for motoren som funktion af momentet. Motorens nominelle omdrejningstal er 1.440 rpm og det nominelle moment er ca. 26 Nm. Som det ses i figuren, har spændingen ikke nogen nævneværdig betydning for virkningsgraden. Hverken ved 50 Hz eller 25 Hz. Spændingen har derfor heller ikke nogen nævneværdig betydning for tabene i motoren (se figur 8.2).



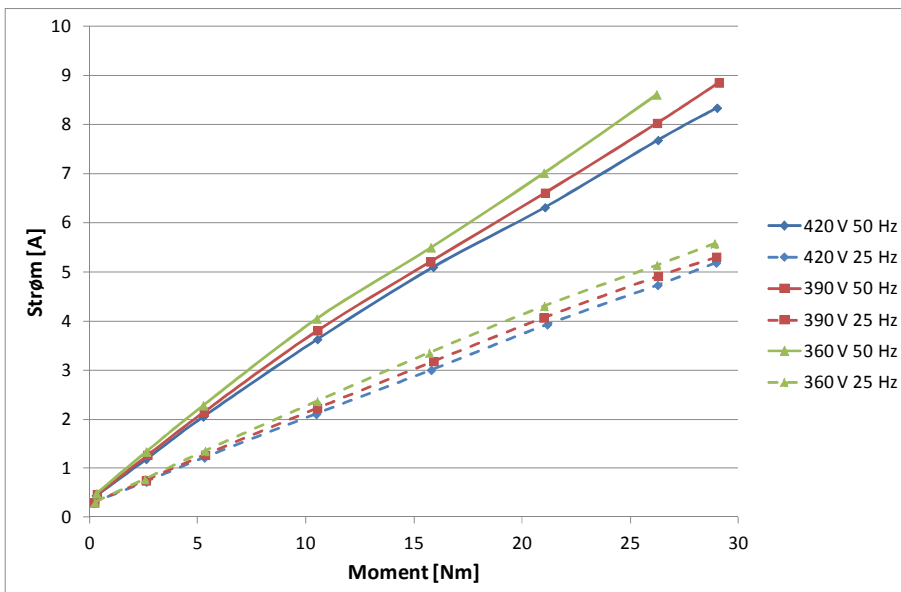
Figur 8.1. Virkningsgrader for Grundfos 4-polet 4 kW EFF1 motor ved forskellige spændinger som funktion af momentet



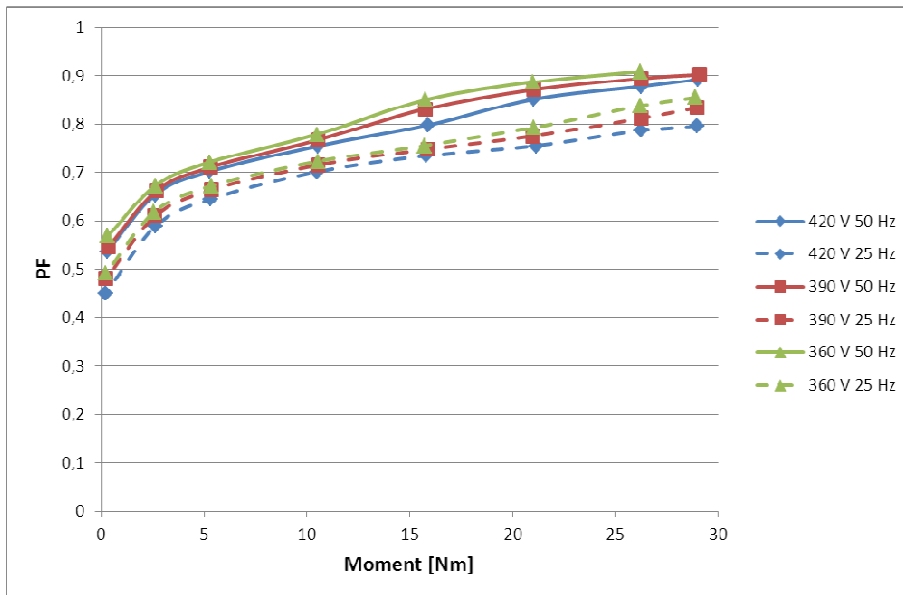


Figur 8.2. Motortab for Grundfos 4-polet 4 kW EFF1 motor ved forskellige spændinger som funktion af momentet

I figur 8.3 og 8.4 ses, ved forskellige spændinger, strøm og effektfaktor for motoren som funktion af momentet. Strømmen er højest ved lave spændinger i hele momentområdet. Effektfaktoren er også højest ved lave spændinger ved alle momenter.

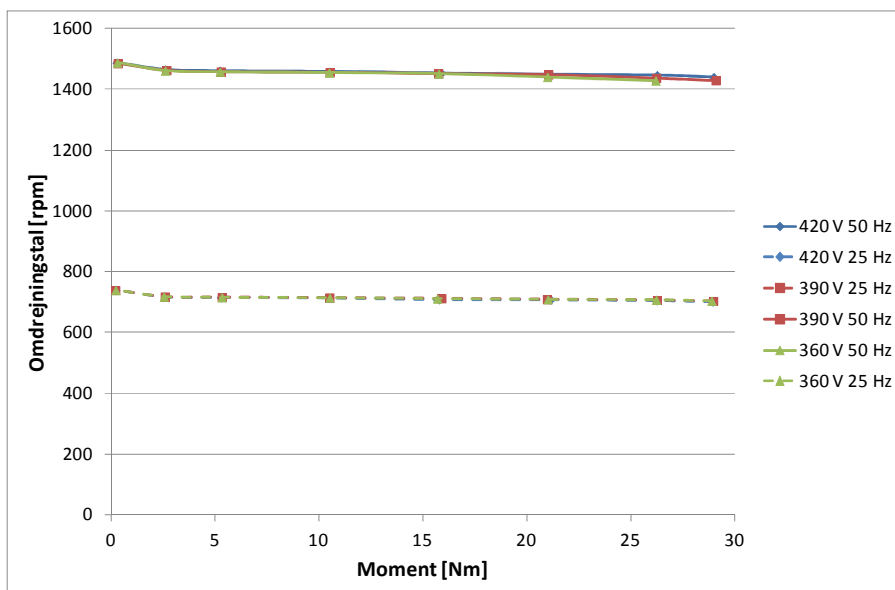


Figur 8.3. Strøm for Grundfos 4-polet 4 kW EFF1 motor ved forskellige spændinger som funktion af momentet



Figur 8.4. Effektfaktor (PF) for Grundfos 4-polet 4 kW EFF1 motor ved forskellige spændinger som funktion af momentet

I figur 8.5 ses omdrejningstal for motoren ved forskellige spændinger og frekvenser som funktion af momentet. Som det ses er omdrejningstallet ved samme frekvens uafhængigt spændingen.

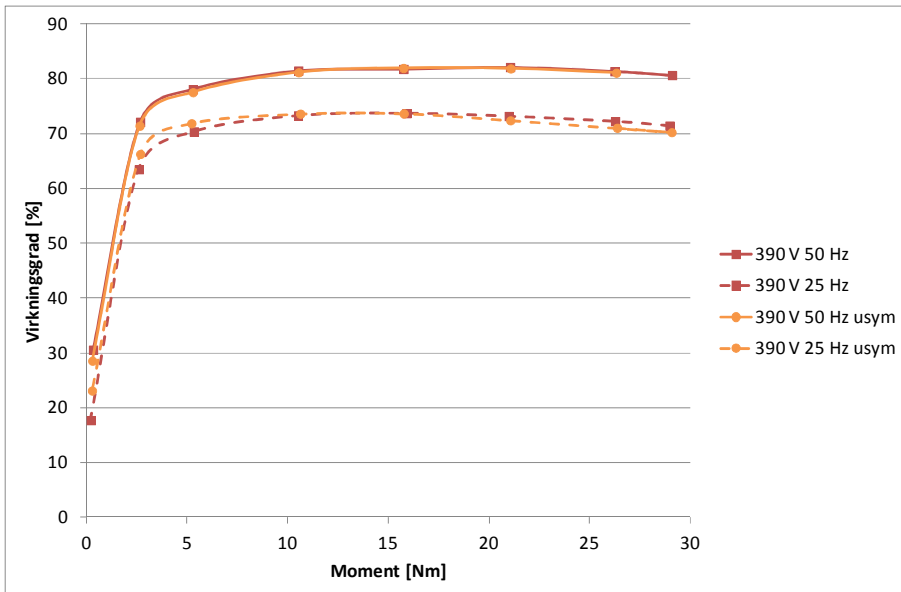


Figur 8.5. Omdrejningstal for Grundfos 4-polet 4 kW EFF1 motor ved forskellige spændinger som funktion af momentet

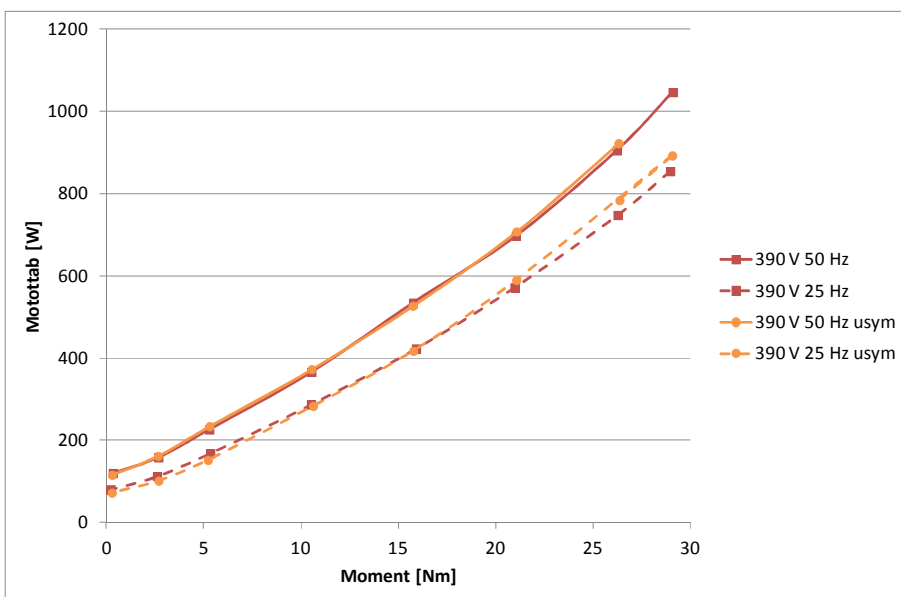
## 8.2 Grundfos 4-polet 4 kW motor – usymmetrisk spænding

I figur 8.6 ses, ved henholdsvis symmetriske og usymmetriske spændinger samt to frekvenser, virkningsgrader for Grundfos 4-polet 4 kW frekvensomformertilsluttet EFF1 motor som funktion af momentet. Ved usymmetrisk spænding er spændingen 7 % lavere på L1-fasen, svarende til 214 V. Frekvensomformerens tillod ikke en spænding lavere end de 214 V på L1-fasen.

Som det ses i figuren, har spændingen og usymmetrien i denne ikke nogen nævneværdig betydning for virkningsgraden. Hverken ved 50 Hz eller 25 Hz. Spændingen og usymmetrien i denne har derfor heller ikke nogen nævneværdig betydning for tabene i motoren (se figur 8.7).



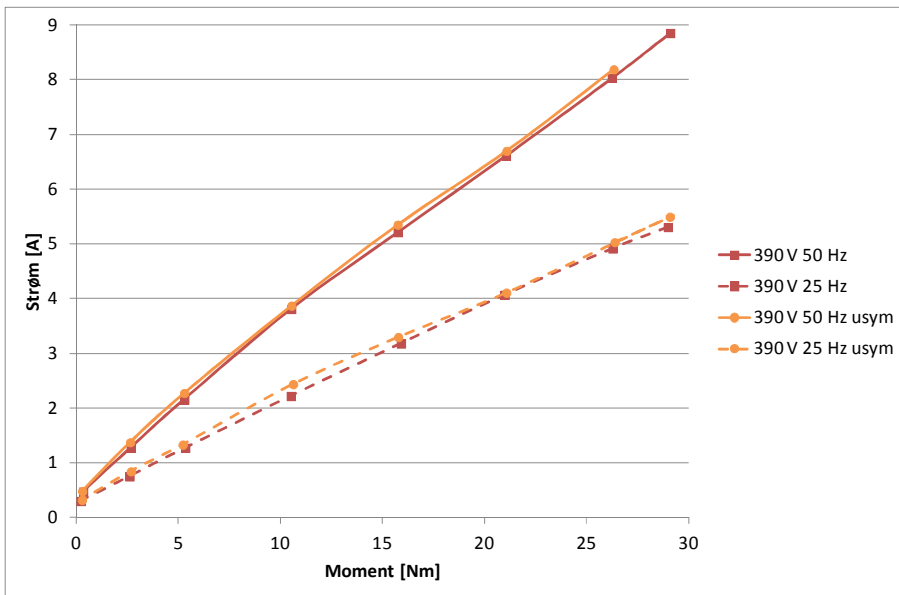
Figur 8.6. Virkningsgrader for Grundfos 4-polet 4 kW EFF1 motor som funktion af momentet ved symmetrisk og usymmetrisk spænding



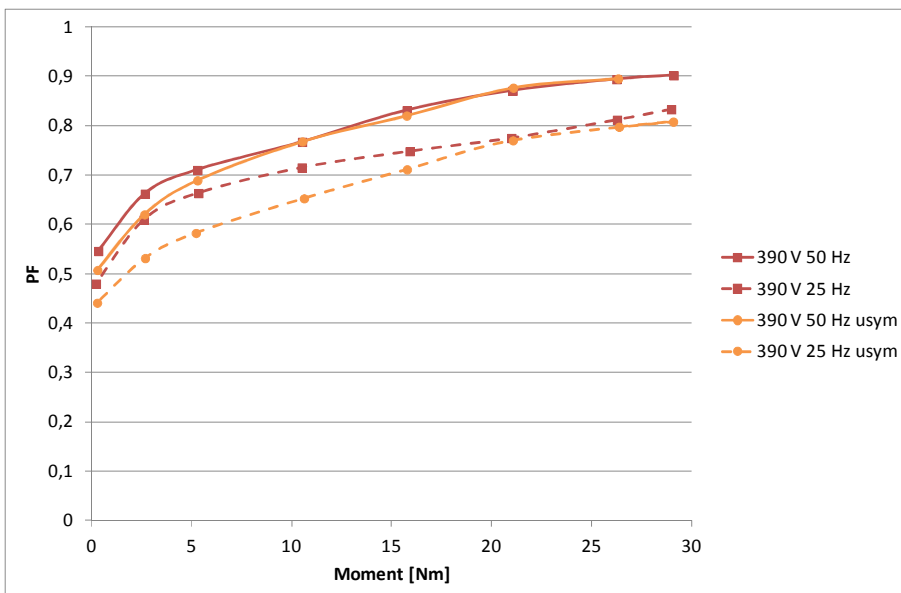
Figur 8.7. Motortab for Grundfos 4-polet 4 kW EFF1 motor som funktion af momentet ved symmetrisk og usymmetrisk spænding

I figur 8.8 og 8.9 ses, ved henholdsvis symmetriske og usymmetriske spændinger, strøm og effektfaktor for motoren som funktion af momentet. Som det ses har den usymmetriske spænding ikke nogen nævneværdig betydning strømmen.

Den usymmetriske spænding har ikke nogen nævneværdig betydning for effektfaktoren ved 50 Hz. Ved 25 Hz ses at effektfaktoren bliver lavere end ved symmetrisk spænding. Dette er specielt udtalt ved lave momenter.

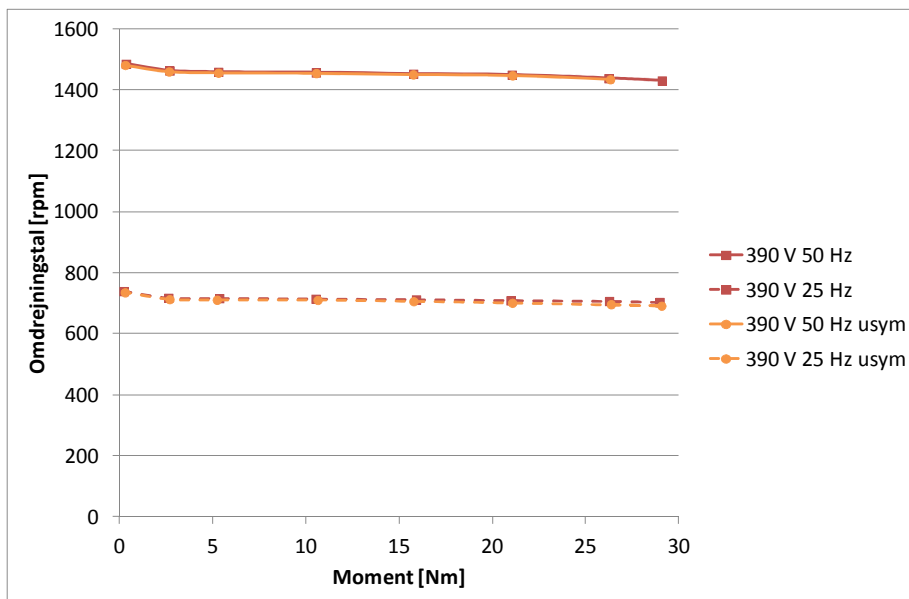


Figur 8.8. Strøm for Grundfos 4-polet 4 kW EFF1 motor som funktion af momentet ved symmetrisk og usymmetrisk spænding



Figur 8.9 Effektfaktor (PF) for Grundfos 4-polet 4 kW EFF1 motor som funktion af momentet ved symmetrisk og usymmetrisk spænding

I figur 8.10 ses omdrejningstal for motoren ved henholdsvis symmetriske og usymmetriske spændinger samt to frekvenser som funktion af momentet. Som det ses er omdrejningstallet ved samme frekvens uafhængigt af spændingen. Den usymmetriske spænding har heller ikke nogen indvirkning på omdrejningstallet.



Figur 8.10. Omdrejningstal for Grundfos 4-polet 4 kW EFF1 motor som funktion af momentet ved symmetrisk og usymmetrisk spænding

### 8.3 Kommentarer til målingerne på motor med frekvensomformer

Virkningsgraden for motor plus frekvensomformer er næsten uafhængig af spændingen, se figur 8.1. Resultaterne for 50 Hz kan dog tolkes sådan, at virkningsgraden ved belastninger over ca. 50% er lidt lavere ved 360 V end ved de højere spændinger, mens virkningsgraden ved belastninger under 50% er mindre ved 420 V end ved de lavere spændinger. Det kan skyldes, at frekvensomformerens søger at fastholde konstant  $V/f$  (udgangsspænding divideret med frekvensen), men da den ikke kan hæve  $V$  over forsyningsspændingen, vil lave forsyningsspændinger blive overført som udgangsspændinger (V) ved 50 Hz samt ved frekvenser tæt på 50 Hz. Ved 25 Hz er udgangsspændingen  $V$  uafhængig af forsyningsspændingen (så længe den er over ca. 210 V).

Der er muligvis også lidt forskel i frekvensomformerens tab ved de forskellige spændinger. Frede Blaabjerg fra AaU har kommenteret målingerne og den mulige besparelse ved lave spændinger og lav last således:

"Der er nogle parametre, der kan trække en anelse i den retning, men nogle andre der trækker i modsat. Hvis vi går ned i spænding vil

- Ledetabene i ensretteren blive lidt større (mere tab)
- Strømtabene i dc-spolen (hvis en sådan er der) blive lidt større (mere tab)
- Jern-tab i dc-spolen kunne falde en anelse
- I transistorerne mod motoren kunne switch-tabene blive en anelse mindre da dc spænding er mindre
- I motoren kan jerntabene blive en lille anelse mindre pga de spændingsharmoniske bliver en anelse mindre ved mindre dc (indtil vi går i overmodulation – specielt ved 50 Hz)"

Målingerne viser, at effektfaktoren (PF figur 8.4) bliver lidt større, når spændingen til frekvensomformerens sættes ned. Den lidt større effektfaktor opvejer dog kun delvis den lavere spænding, og figur 8.3 viser derfor, at strømmen i alle situationer er større, jo lavere spændingen er.

## 9 Konklusion vedr. erhvervslivets motorer

For en direkte forsynet asynkronmotor afhænger ændringen i den optagne effekt og i energiforbruget ved en given spændingsændring af:

- niveauet af spændingen før ændringen
- belastningens karakter
- motorens effektivitet

Som nævnt i afsnit 5 betyder en højere før-spænding, at ændringerne i effekt og energi bliver større i det lave belastningsområde og mindre i det høje belastningsområde. Dagens spændingsniveau i erhvervslivet skønnes typisk at være 225-230 V, idet elselskaberne typisk holder 232-240 V i lavspændingsafgangene fra 10/0,4 kV stationerne og der i lavspændingsnettet og i erhvervslivets installationer skønnes typisk at være et spændingsfald på 2-5%. I afsnit 5 er 231 V (400 V yderspænding) benyttet som før-spænding, og resultaterne i afsnit 5 kan derfor benyttes som et rimeligt bud på spændingsafhængigheden for danske motorer (men med forbehold for motorenes effektivitet).

Motorbelastningerne har typisk enten kvadratisk moment eller konstant moment. I afsnit 5 er effekt og energi beregnet for begge disse moment-typer, og et gennemsnit af de beregnede effekter og af de beregnede energiforbrug vil derfor være et rimeligt bud på spændingsafhængigheden.

De målte virkningsgrader for motorerne ved 100% belastning og 400 V er vist i tabel 9.1 sammen med minimums-virkningsgraderne for IE1 og IE2 motorer. Ifølge målingerne er 1,1 kW og 18,5 kW ABB motorerne af effektivitetsklasse IE2, og ABB 5,5 kW motoren er i den øvre ende af klasse IE1. Loher motoren er en IE1 motor, mens BBC motoren ligger under energiklasse IE1. Dagens motorer er som gennemsnit IE1 motorer, dvs. tabene er større end målt for ABB motorerne, og spændingsafhængigheden bliver derfor også større end fundet for ABB-motorerne (idet spændingsafhængigheden øges med voksende tab og voksende slip).

Fabrikat	Mærkeeffekt kW	Målt virkn.grad %	Min. virkn.grad i % for energiklasse	
			IE1	IE2
ABB	1,1	83,1	75,0	81,4
Loher	5,0	85,6	(84,7)	(87,77)
ABB	5,5	87,3	84,7	87,7
BBC	18,5	88,2	89,3	90,9
ABB	18,5	91,3	89,3	90,9

Tabel 9.1 Virkningsgrader for de fem målte motorer

På baggrund af disse betragtninger er den forventede spændingsafhængighed for dansk erhvervslivs motorer skønnet i tabel 9.2. Tabellen gælder både for den optagne effekt og for elforbruget, idet der i afsnit 5 ikke ses nogen markant forskel på effektens og energiens spændingsafhængighed.

Mærkeeffekt kW	Belastningsgrad, %			
	0-5	6-15	16-40	41-
0-1,0	18	12	7	2
1,1-4,0	15	8	3	0
4,1-15,0	14	6	2	0
16-100	10	4	1	0
101-	7	3	1	0

Tabel 9.2 Skøn over den gennemsnitlige effektreduktion, hvis spændingen til erhvervslivets motorer sænkes 10% fra 400 V til 360 V

EU's krav til direkte forsynede motorer er fra 2011 effektivitetsklasse IE2 og fra 2015/17 klasse IE3. Efterhånden som motorerne i dansk erhvervsliv udskiftes med mere effektive motorer, falder tabene, og dermed mindskes motorernes spændingsafhængighed. På længere sigt må spændingsafhængigheden derfor ventes at blive mindre end angivet i tabel 9.2.



# **Bilag 1. Kort beskrivelse af Elforsk-projekt nr. 343-004:**

## **Spændingsstyring i erhvervsvirksomheder – værktøj til fastlæggelse af muligheder og besparelspotentiale**

### **Formålet med projektet**

Projektets formål har været at vurdere, i hvilket omfang der kan spares elenergi ved at sænke spændingen. Det har endvidere været formålet at udvikle et værktøj til energirådgivere og virksomheder til vurdering af, om en konkret virksomhed med fordel vil kunne reducere spændingsniveauet. Desuden har erfaringerne skullet formidles, så spændingsstyring kan vælges der, hvor det er teknisk-økonomisk optimalt.

### **Aktiviteter**

Ved projektets start var der en del usikkerhed om, hvad en lavere spænding betyder for elmotorers elforbrug. Der er derfor hos Teknologisk Institut gennemført laboratorie-undersøgelser af asynkronmotorers spændingsafhængighed. Der er målt på fem direkte forsynede motorer samt på en motor, forsynet fra frekvensomformer og motorer med usymmetrisk spændingsforsyning.

Lyskildernes spændingsafhængighed var bedre kendt, da projektet startede, men der manglede pålidelige tal for størrelsen denne afhængighed. Teknologisk Institut har derfor målt på en række forskellige lyskilde med forskellige forkoblinger ved spændinger i intervallet 190-254 V.

Med de to laboratorieundersøgelser som grundlag er der udarbejdet et værktøj til vurdering af besparelsemulighederne i konkrete installationer. Værktøjet er bl. a. afprøvet i den århusianske kontorejendom Jægergården, der anvender spændingssænkende udstyr, og i Københavns Lufthavne i Kastrup, hvor spændingen er sænket med brug af 10/0,4 kV transformernes trinkoblere. Erfaringerne med værktøjet har været, at det er nemt at bruge og at brugervejledningen (guiden) er nyttig.

Projektets resultater er løbende formidlet gennem en serie rapporter, foredrag og artikler. Projektet påbegyndtes i marts 2011 og afsluttedes november 2012.

### **Værktøjet**

Der er udarbejdet et regnearks-baseret værktøj til fastlæggelse af muligheder og besparelspotentialer ved spændingsstyring i en konkret virksomhed eller et bygningsområde. For lyskilder, der påvirkes af en spændingssænkning, skal man opgøre antal lyskilder og driftstiden pr. type og wattage. For direkte forsynede asynkronmotorer, der er lavt belastede, skal motorernes effektoptag og driftstid opgøres. De samme to oplysninger – effektoptag og driftstid – skal opgøres for de elvarmelegemer, hvis elforbrug er spændingsafhængigt. Ud fra disse oplysninger beregner værktøjet elbesparelsen og økonomien ved den planlagte spændingssænkning.

Vejledningen til værktøjet findes i værktøjet selv samt i rapporten " Guide til spændingsstyring i erhvervsvirksomheder". Den nyeste version af værktøjet kan hentes fra [www.elforsk.dk](http://www.elforsk.dk) under projekt nr. 343-004.

## Rapporter

*Laboratoriemålinger af asynkronmotorers spændingsafhængighed. Januar 2012.*

Rapporten beskriver målinger, der hos Teknologisk Institut er gennemført på en række motorer. Målingerne omfatter optagen effekt og motortab samt øvrige elektriske data ved seks spændingsniveauer i intervallet 330 – 440 V (fasespænding 191 – 254 V). Målingerne er udført på tre nye motorer på 1,1, 5,5 og 18,5 kW samt på to ældre på 5 og 18,5 kW, alle direkte forsynede. Der er endvidere målt på en 4 kW motor, forsynet via frekvensomformer. Målingerne er udført med symmetriske spændinger, og for 4 kW samt 5,5 kW motoren er der også målt ved usymmetrisk spænding.

*Laboratoriemålinger af lyskilders spændingsafhængighed. April 2012.*

Effekttaget og belysningsstyrken er målt for en række lyskilder ved spændinger fra 190 V til 254 V. Målingerne er udført af Teknologisk Institut og har omfattet lysstofrør, kompakt-lystofrør, kviksløvdampplamper, højtryksnatriumlamper og metalhalogenlamper, alle med dels konventionelle forkoblinger, dels elektroniske forkoblinger. Desuden er der målt på en LED lyskilde samt på en glødelampe.

*Guide til spændingsstyring i erhvervsvirksomheder. November 2012.*

Guiden beskriver i tekst og ved rutediagram, hvordan besparelsesmulighederne analyseres og kortlægges med brug af værktøjet. Herunder beskrives også vurderingen af den mulige spændingssænkning. I guidens del II er der en generel beskrivelse af spændingssænkning og hvordan besparelsen kontrolleres. Der omtales en række vigtige forhold ud over økonomien. Desuden omtales alternative besparelsesmuligheder, og der gives en række gode råd.

*Effekten af spændingssænkning i Jægergården, Aarhus. November 2012*

Der er foretaget målinger på den kommunale ejendom Jægergården i Aarhus. I lavlastperioder er effekttaget ikke afhængigt af spændingsniveauet. I højlastperioder er der opnået en besparelse på 2%. Målingerne er foretaget efter, at en del af lysinstallationen er fornyet med rør med elektroniske forkoblinger, hvor der ikke spares noget.

*Eksempler på elbesparelser ved spændingsstyring i kommunale bygninger. November 2012*

Rapporten beskriver elbesparelsen og økonomien i seks bygninger, hvor der er installeret spændingssænkende udstyr. Elbesparelsen er opgjort ved målinger – udført af PSS Energy – af bygningernes optagne elfeffekt med det spændingssænkende udstyr skiftevis indkoblet og udkoblet.

*Spændingsregulering. Københavns Lufthavne. November 2012*

Københavns Lufthavne startede i 2010 med at sænke det generelle spændingsniveau. Der afprøvedes flere typer spændingssænkende udstyr, men det valgtes at sænke spændingen til ca. 220 Volt med brug af transformernes trinkobler. Pr. august 2012 er spændingen sænket for ca. 60% af lufthavnens elforbrug, og besparelsen opgøres til ca. 3% af lufthavnens samlede elforbrug. Rapporten beskriver erfaringerne og analyserer de opnåede elbesparelser i to butikker i lufthavnens shoppingcenter og i et parkeringshus. Desuden analyseres besparelsespotentiallet i Hilton hoteller, hvor spændingen endnu ikke er sænket.

## Artikel

Sænk spændingen og spar på elektriciteten. HVAC nr. 3. 2012.

### **Projektgruppe**

Dansk Energi Analyse A/S	Mogens Johansson (projektleder)
Københavns Lufthavne A/S	Hans Andersen Jesper Siegmann
Kuben Management	Søren Juul Hansen (fra april 2012) Jesper Hansson (til marts 2012)
Lokalenergi	Christina Monrad Andersen (fra januar 2012) Jonas Lassen (til december 2011)
Teknologisk Institut	Claus Hvenegaard J. C. Sørensen

### **Følgegruppe**

Leverandører	Finn Christensen, Wattguard Kristoffer L. Bech, ABB Jørgen Nielsen, PSS Energy Morten Nyholm, TecPartnering Torben Steen Jensen, Mariendal electrics
Elnet	Niels Chr. Nordentoft, Dansk Energi Stig Kortsen, DONG Energy
Rådgivere	Henning Højte Hansen, Balslev Kenneth Søgaard, Moe & Brødskov
Elforsk	Jørn Borup Jensen, Dansk Energi