

# Guide til spændingsstyring i erhvervsvirksomheder

Delrapport til  
Elforsk PSO-projekt nr. 343-004

Oktober 2012

# **Guide til spændingsstyring i erhvervsvirksomheder**

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

November 2012

## Indhold

1. Indledning .....	3
Del I. Analyse af besparelsesmuligheder.....	4
2. Vurdering af den mulige spændingssænkning.....	4
2.1 Nuværende spændingsforhold .....	4
2.2 Fastlæggelse af den mulige spændingssænkning .....	4
2.3 Særligt spændingsfølsomt udstyr.....	5
3. Kortlægning af spændingsfølsomt udstyr.....	5
3.1 Lyskilder .....	5
3.2 Motorer .....	6
3.3 Termiske belastninger.....	7
4. Beregning med værktøjet.....	7
4.1 Nødvendige data .....	8
4.2 Resultater .....	11
4.3 Økonomi inkl. serviceudgifter .....	11
4.4 Vurdering af resultaterne .....	12
Del II. Generel beskrivelse af spændingsstyring .....	13
5. Spændingsforholdene hos elforbrugerne .....	13
5.1 Leveringsspænding .....	13
5.2 Spændingen i installationerne.....	13
5.3 Usymmetri og harmoniske.....	13
6. Udstyr til spændingsstyring .....	14
6.1 Udstyr for procentuel spændingsreduktion.....	14
6.2 Udstyr for fastholdt spænding .....	15
6.3 Tilslutning af udstyret.....	15
7. Apparaters spændingsafhængighed .....	15
7.1 Lyskilder .....	15
7.2 Motorer .....	16
7.3 Varmelegemer .....	17
7.4 Elektronik og andet.....	17
8. Vigtige forhold ud over økonomien .....	18
8.1 Reduktion af spændingsvariationer .....	18
8.2 Levetid og vedligeholdelseskostninger.....	18
8.3 Leverandørgarantier.....	18
8.4 Motorers omløbstal.....	19
8.5 Motorers startmoment.....	19
8.6 Motorers fuldlast.....	19
8.7 Netbelastninger .....	19
8.8 Transformerbeklastninger.....	19
8.9 Kortslutningseffekt .....	19
8.10 Spændingsdyk.....	20
8.11 Utilsigtet start af nødforsyningsanlæg .....	20
9. Kontrol af elbesparelsen .....	20
9.1 Elbesparelse opgjort ved ind- og udkobling af udstyret .....	20
9.2 Statistisk analyse af målte elforbrug.....	21
9.3 Elbesparelsen opgjort ud fra elforbrug før og efter idriftsættelsen.....	22
10. Alternative besparelsesmuligheder .....	23
10.1 Den bedste løsning?.....	23

10.2 Belysningsanlæg .....	23
10.3 Motorer .....	23
11. Gode råd.....	23
12. Referencer.....	25
Bilag 1. Leverandører af spændingssænkende udstyr .....	26
Bilag 2. Lyskilders effektoptag.....	27
Bilag 3. Rutediagram for analyse af besparelsesmulighederne .....	28
Bilag 4. Kort beskrivelse af Elforsk-projekt nr. 343-004:.....	31
Spændingsstyring i erhvervsvirksomheder – værktøj til fastlæggelse af muligheder og besparelspotentiale	

## 1. Indledning

Guiden er tænkt som et let tilgængeligt opslagsværk og vejledning for alle, der arbejder med eller overvejer at indføre spændingsstyring, herunder energimedarbejdere i virksomheder, kommuner og ejendomsselskaber, energirådgivere, installatører og rådgivende ingeniører.

Spændingsstyring er indført en række steder i de senere år som en nem og forholdsvis økonomisk måde at spare el på. Der er et stort potentiale for spændingsstyring, men det er ikke alle steder, der kan spares el ved at sænke spændingen. Derfor er det vigtigt, at installationerne vurderes grundigt, før der træffes beslutning om at sænke spændingen.

Guiden beskriver i del I, hvordan mulighederne vurderes i en konkret installation, og hvordan den potentielle elbesparelse beregnes med "Værktøj til analyse af spændingsstyring". I del II giver guiden en generel indføring i spændingsforholdene i lavspændingsnettet og i udstyr til spændingsstyring, og den beskriver det elforbrugende udstyrs spændingsafhængighed. Desuden omtaler den andre forhold end de økonomiske, som også er vigtige. Endelig gør guiden opmærksom på, at der ofte kan opnås større elbesparelser med mere gennemgribende tiltag som eksempelvis at renover belysningen eller udskifte elmotorer.

Forløbet af en analyse er skitseret i form af et rutediagram i bilag 3.

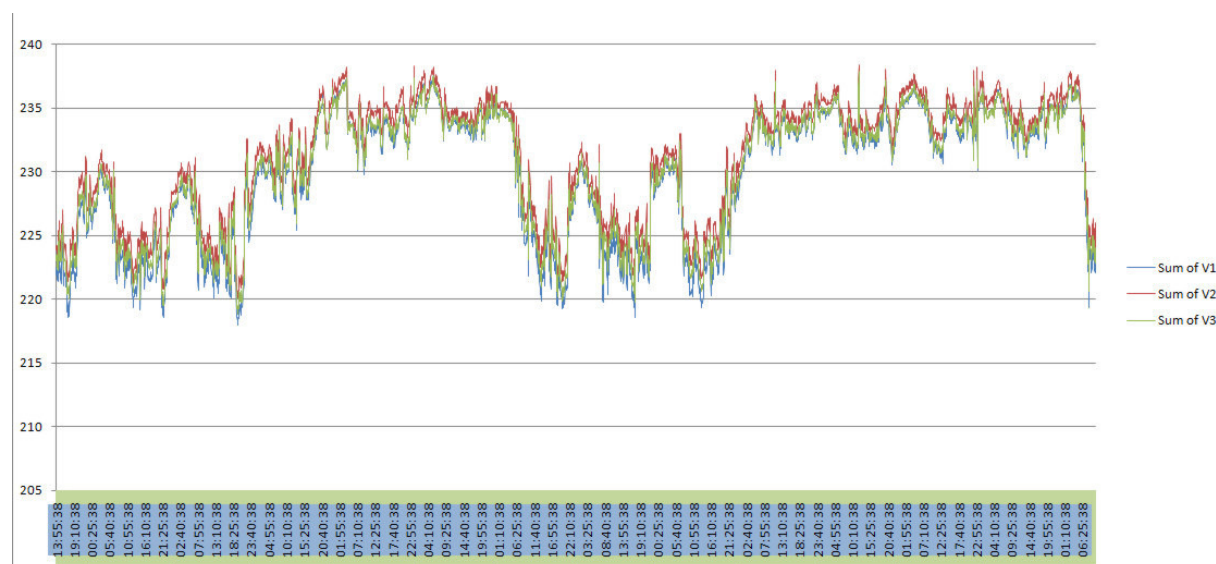
## Del I. Analyse af besparelsmuligheder

I guidens del I beskrives analysen af besparelsmulighederne ved spændingsstyring i en konkret virksomhed. Analysen starter med, at der vurderes, hvor meget spændingen kan sænkes, hvorefter effekten og driftstiden for det spændingsfølsomme udstyr vurderes, og der gennemføres en beregning af besparelsmulighederne med "Værktøj til analyse af spændingsstyring". Forløbet af analysen er mere detaljeret vist i bilag 3, Rutediagram for analyse af besparelsmulighederne.

### 2. Vurdering af den mulige spændingssænkning

#### 2.1 Nuværende spændingsforhold

Det er nødvendigt at skabe et godt overblik over spændingsforholdene i installationen for at kunne vurdere, hvor meget spændingen kan sænkes. Da spændingen kan variere meget over døgnet og ugen og også kan variere fra uge til uge, bør spændingen måles og registreres over mindst to uger, der vælges i en periode, hvor installationens elbelastning er høj. Det er nødvendigt at måle spændingen i alle tre faser, da spændingerne kan være forskellige. Figur 1 viser et eksempel på en sådan måling.



Figur 1. Spændingen målt i tre faser over 13 dage

Spændingen skal måles flere steder i installationen. Den måles dels helt tæt på det sted, hvor det spændingssænkende udstyr påtænkes indsat, og dels i installationens "fjerneste punkt", dvs. hvor spændingen forventes at være lavest. Er der særligt spændingsfølsomt udstyr, bør spændingen også måles ved dette udstyr. Målingerne i de forskellige punkter bør foregå samtidigt.

#### 2.2 Fastlæggelse af den mulige spændingssænkning

Ud fra de nuværende spændingsforhold vurderes, hvor meget forsyningsspændingen til installationens apparater kan sænkes. Som udgangspunkt må det forventes, at apparaterne fungerer tilfredsstillende ved den nedre grænse for standardspændingen, dvs. ved 207 V. Men en lidt højere minimumsspænding kan begrundes at muligheden for, at spændingen kan være lavere i andre dele af året end i de uger, hvor den er målt, eller i andre særlige forhold eller i ønsket om en ekstra sikkerhed.

For udstyr med procentuel spændingsreduktion beregnes den mulige spændingssænkning herefter som den laveste af de registrerede fasespændinger minus den fastsatte minimumsspænding:

$$\Delta V = V_{\text{lavest}} - V_{\text{min}}$$

og den procentuelle spændingssænkning beregnes som

$$\Delta V\% = \Delta V / V_{\text{lavest}} \cdot 100 \%$$

Af udstyrets spændingstrin vælges det, der ligger nærmest, men under  $\Delta V\%$ .

Udstyr for fast spænding indstilles til en udgangsspænding på  $V_{\text{min}}$ . Den procentvise spændingsreduktion og elbesparelserne vil variere over døgnet og året, hvorfor det er nødvendigt at lave en varighedskurve for spændingen eller at tilnærme med nogle niveauer for spændingen, hvis man ønsker at beregne besparelsen i det årlige elforbrug. I værktøjet er det forenklet til en varighedskurve med to eller tre spændingsniveauer, se figur 3.

### 2.3 Særligt spændingsfølsomt udstyr

Er der udstyr, som er særligt spændingsfølsomt eller som forsynes fra et langt kabel med stort spændingsfald, bør det overveje at holde dette udstyr fri af spændingssænkningen. Det kan ske ved at forsyne det fra en tavle med højere spænding eller ved at opsætte spændingsforhøjende udstyr lige foran. Det vil muliggøre, at spændingen til de øvrige apparater kan sænkes yderligere og vil dermed give en større elbesparelse.

## 3. Kortlægning af spændingsfølsomt udstyr

I kortlægningen indgår en opgørelse af udstyrenes driftstimer. Bliver der tale om at spændingssænke med en bestemt procentsats (samme sats hele året), er det de årlige driftstimer, der indgår. For udstyr med fast udgangsspænding kan størrelsen af spændingssænkningen variere over året, og derfor kan det være nødvendigt at angive to eller tre niveauer for spændingssænkningen og opgøre driftstimerne i de perioder, som hvert niveau repræsenterer, se figur 3.

### 3.1 Lyskilder

Der kan opnås reduktioner af effektoptaget ved reduktion af spændingen for følgende lyskilder:

- Glødelamper og halogenlamper
- Lysstofrør med konventionelle forkoblinger
- Damplamper med konventionelle forkoblinger

Det er derfor kun interessant at kortlægge disse typer lyskilder.

#### Nødvendige registreringer

- Antal armaturer og antal lyskilder pr. armatur
- Effekter inkl. tab i forkoblingsenheder
- Driftstimer pr. spændingsniveau

I bilag 2 ses en tabel med effektoptag for forskellige lyskilder inkl. forkoblingsenhed.

Ofte er det svært at konstatere, hvilken forkoblingsenhed (konventionel eller elektronisk) der er installeret i armaturer for lysstofrør og damp-lamper. Nedenfor ses en smart metode til detektering af forkoblingsenheder.

### Detektering af forkoblingsenheder

Philips markedsfører et håndholdt apparat "Ballast Checker" som kan anvendes til at identificere, om en forkoblingsenhed er konventionel eller elektronisk. Når der peges på et armatur, vil en lille diode i det håndholdte apparat lyse grønt, hvis armaturet er forsynet af en elektronisk forkobling og orange, hvis det er forsynet med en konventionel forkobling. Apparatet kan identificere forkoblingsenheden på en afstand op til 15 m.

Detekteringen kan også ske med mobiltelefonens kamera, som viser et flimrende billede af lyskilder med konventionelle forkoblinger. Det vides dog ikke, om metoden er anvendelig i alle situationer.

### 3.2 Motorer

Der kan opnås reduktioner af effektoptaget ved reduktion af spændingen for direkte nettilsluttede asynkronmotorer. Det er derfor kun interessant at kortlægge disse motorer. Reduktionen af effektoptaget afhænger af motorens mærkeeffekt (motorens størrelse) og belastningsgraden,

#### Nødvendige målinger og registreringer

- Motorstørrelser (nominelle mærkeeffekter)
- Effektoptag
- Belastningsgrader
- Driftstimer pr. spændingsniveau.

#### Måling af belastningsgraden

Belastningsgraden for en motor er forholdet mellem motorens afgivne effekt (akseffekten) og motorens nominelle effekt (mærkeeffekten). Akseffekten kan i princippet kun bestemmes, hvis man kender det afgivne moment på motorens aksel og omdrejningstallet. Omdrejningstallet kan rimeligt nemt måles, mens det i praksis er umuligt at måle det afgivne moment, medmindre man har en momentprøvestand med en momentmåler til rådighed.

En ikke så præcis metode er at måle motorens effektoptag og dividere det med motorens nominelle effekt. I praksis afviger denne "belastningsgrad" 5 – 20 % fra den rigtige belastningsgrad, så den giver et rimeligt godt billede af, hvor hårdt motoren er belastet.

En anden metode til vurdering af motorens belastningsgrad tager udgangspunkt i motorens omløbstal ved mærkeeffekten  $n_{\text{mærke}}$  og det aktuelle omløbstal  $n_{\text{aktuel}}$ . Ud fra disse to tal beregnes slippene  $s$ , dvs. afvigelsen fra det nominelle omløbstal  $n_{\text{nom}}$  på 3000 (2-polet motor), 1500 (4-polet) eller 1000 (6-polet):

$$s_{\text{mærke}} = (n_{\text{nom}} - n_{\text{mærke}}) : n_{\text{nom}}$$

$$s_{\text{aktuel}} = (n_{\text{nom}} - n_{\text{aktuel}}) : n_{\text{nom}}$$

En motors belastning er omtrent ligefrem proportional med slippet, dvs.

$$\text{Motorens belastningsgrad} = s_{\text{aktuel}} : s_{\text{mærke}} = (n_{\text{nom}} - n_{\text{aktuel}}) : (n_{\text{nom}} - n_{\text{mærke}})$$

$n_{\text{nom}}$  fremgår af motorens poltal.  $n_{\text{aktuel}}$  kan måles med f. eks. tachometer.  $n_{\text{mærke}}$  aflæses på motorens mærkeplade. Er det ikke muligt, kan de typiske værdier i tabel 1 benyttes.



Mærkeeffekt kW	Antal poler		
	6	4	2
0-1,0	950	1420	2860
1,1-4,0	960	1440	2890
4,1-15,0	970	1460	2910
15,1-100	980	1475	2950
101-	990	1485	2975

Tabel 1. Typiske mærke-omdrejningstal (o/min.) for elmotorer (IE2 motorer)

### Typiske belastningsgrader for motorer

For at foretage en nogenlunde nøjagtig vurdering af besparelsespotentialer er det nødvendigt at gennemføre nogle målinger og registreringer på motorerne. Ønsker man blot at foretage et hurtigt skøn af besparelsespotentialer ved reduktion af spændingen, kan tabel 2 være en hjælp.

	Motorstørrelse [kW]		
	0 - 4	4 - 30	30 - 500
Ventilation	55	60	70
Pumper	50	55	60
Trykluft	70	75	75
Køling	70	70	70
Hydraulik	75	75	75
Anden motordrift	35	40	45

Tabel 2. Typiske belastningsgrader i % for motorer til forskellige applikationer i afhængighed af motorstørrelsen

Sammenholdes tabel 2 med tabel 4 (som viser, at det stort set kun er for motorer, som er belastet under 40%, at der opnås en besparelse ved at sænke spændingen) ses det, at det kun er ved "Anden motordrift", der vil kunne opnås en besparelse. Dette gælder som hovedregel, men der er mange individuelle afvigelser herfra i form af lavt belastede motorer til alle typer af formål.

### 3.3 Termiske belastninger

Der kan opnås reduktioner af effektoptaget ved reduktion af spændingen for termiske belastninger, som er uden styring (uden termostatstyring og lignende). Der opnås også reduktioner af effektoptaget ved reduktion af spændingen for termiske belastninger med styring, men driftstiden forlænges.

### Nødvendige registreringer

- Installerede eller optagne effekter
- Styring efter ydelse eller ustyrede
- Driftstimer pr. spændingsniveau

## 4. Beregning med værktøjet

Værktøjet er udviklet til energimedarbejdere i virksomheder og til energirådgivere mv., for at de kan opgøre og dokumentere elbesparelsesmulighederne ved at sænke spændingen i en konkret virksomhed. Værktøjet er regnearksbaseret og er ret detaljeret, da det er nødvendigt at kortlægge de enkelte typer af lysinstallationer og elmotorer mv., hvis potentialer skal beregnes med rimelig nøjagtighed.

## 4.1 Nødvendige data

### Stamdata og data for spændingen

I værktøjet skal der, som det ses i figur 2, først indtastes stamdata for virksomheden, herunder virksomhedens eller områdets årlige elforbrug (markeret med rødt).

**Værktøj for beregning af elbesparelse ved spændingsstyring**

Data indtastes i felter, der er markeret med :  Felter markeret med:  er resultatfelter eller tomme

Virksomhed/område:

Virksomhedens/områdets elforbrug:  kWh/år

Vurdering udført af:  Fra firma:  Dato:

Figur 2. Stamdata

Det er muligt – se figur 3 – at indtaste tre forskellige nuværende spændingsniveauer og tre forskellige ønskede spændingsniveauer (markeret med blå). Det er endvidere muligt at indtaste de dertil hørende årlige driftstider (markeret med lilla).

**Spændingssænkning:**

Periode	Nuværende sp., V	Spænding sænkes til, V	Spændingsreduktion, %	Driftstid, h/år
1	405,0	360,0	11,0	6.570
2	400,0	360,0	10,0	2.190
3			0,0	
Sum				8.760
Manglende timer ift. 8760 h/år				0

Figur 3. Data vedr. spænding

### Lyskilder

Oplysninger om spændingsafhængige lyskilder indtastes i værktøjet som vist i figur 4. Der kan indtastes data for følgende lyskilder:

- Lysstofrør med konventionelle forkoblinger
- Kompaktlysstofrør med konventionelle forkoblinger
- Glødelamper
- Højtryksnatrium damplamper
- Kviksølv damplamper
- Metalhalogenlamper

I figur 4 er vist inddateringsfelterne for lysstofrør med konventionelle forkoblinger og kompaktlysstofrør med konventionelle forkoblinger. I værktøjet skal der for lyskilderne indtastes antal og driftstid for de forskellige spændingsniveauer (markeret med rødt). Der er som standard indtastet wattager for de forskellige lyskildetyper. For lysstofrør med konventionelle spoler kan der vælges 18 W, 36 W og 58 W lysstofrør.

Elforbruget og besparelsen ved reduktion af spændingen bliver beregnet på baggrund af de mulige spændingsreduktioner (se figur 3) og lyskildernes spændingsafhængighed, opgjort som effektreduktion i % ved 1 % lavere spænding (se figur 5).

**Data for lyskilderne:**

	Watt	Periode 1				Periode 2				Periode 3				Sum periode 1-3		Bemærkninger
		Antal	Driftstid h/år	Elforbrug kWh/år	Besparelse kWh/år	Antal	Driftstid h/år	Elforbrug kWh/år	Besparelse kWh/år	Antal	Driftstid h/år	Elforbrug kWh/år	Besparelse kWh/år	Elforbrug kWh/år	Besparelse kWh/år	
Lysstofrør, konv. forkobling	18			0	0			0	0			0	0	0	0	
	18			0	0			0	0			0	0	0	0	
	18			0	0			0	0			0	0	0	0	
	18			0	0			0	0			0	0	0	0	
	18			0	0			0	0			0	0	0	0	
	36	223	2625	26.342	5.854	223	875	8.781	1.756					35.123	7.610	
	36	6	2625	709	158	6	875	236	47					945	205	
	36	111	3945	19.705	4.379	111	1315	6.568	1.314					26.274	5.693	Halvdelen af de 223, nat
	36			0	0			0	0					0	0	
	36			0	0			0	0					0	0	
	36			0	0			0	0					0	0	
	58	11	2625	2.079	462	11	875	693	139					2.772	601	
	58			0	0			0	0					0	0	
58			0	0			0	0					0	0		
58			0	0			0	0					0	0		
58			0	0			0	0					0	0		
58			0	0			0	0					0	0		
Sum		351		48.835	10.852	351		16.278	3.256	0			0	65.113	14.108	
Kompaktystofrør, konv. forkobling	9	252	2645	8.665	1.733	252	875	2.867	516					11.532	2.249	
	9	252	3945	12.924	2.585	252	1315	4.308	775					17.232	3.360	Drift om natten
	9			0	0			0	0					0	0	
	11			0	0			0	0					0	0	
	11			0	0			0	0					0	0	
	11			0	0			0	0					0	0	
	26			0	0			0	0					0	0	
	26			0	0			0	0					0	0	
26			0	0			0	0					0	0		
sum		504		21.589	4.318	504		7.174	1.291	0			0	28.763	5.609	

Figur 4. Data for spændingsafhængige lyskilder

**Data om lyskilder, hvis elforbrug er spændingsafhængigt**

**Udstyrets spændingsafhængighed, opgjort som effektreduktion i % ved 1% lavere spænding:**

Lyskilder	Effektred. i % v. 1% lavere sp.
Lysstofrør, konv. forkobling	2,0
Kompaktystofrør, konv. fork.	1,8
Glødelamper	1,5
Natriumdampplamper, konv. forkobling	2,0
Kviksølvampplamper, konv. forkobling	2,0
Metalhalogen	2,0

Figur 5. Lyskilders spændingsafhængighed, opgjort som effektreduktion i % ved 1 % lavere spænding

## Motorer

Der kan indtastes data for følgende størrelser motorer:

- 0 – 1 kW
- 1,1 – 4 kW
- 4,1 – 15 kW
- 15,1 – 100 kW
- 101 kW –

I figur 6 er vist inddateringsfelterne for nettilsluttede motorer i størrelserne 0 – 1 kW og 1,1 – 4 kW. I værktøjet skal der for motorerne indtastes antal, belastning (dvs. effektoptag) og driftstid for de forskellige spændingsniveauer (markeret med blå).

**Direkte forsynede asynkronmotorer:**

Motorernes mærkeeffekt kW	Belastningsgrad i %	Antal	Periode 1				Periode 2				Periode 3				Sum periode 1-3		Bemærkninger
			Belastning kW	Driftstid h/år	Elforbrug kWh/år	Besparelse kWh/år	Belastning kW	Driftstid h/år	Elforbrug kWh/år	Besparelse kWh/år	Belastning kW	Driftstid h/år	Elforbrug kWh/år	Besparelse kWh/år	Elforbrug kWh/år	Besparelse kWh/år	
0 - 1,0	0-5				0	0			0	0			0	0	0	0	
	0-5				0	0			0	0			0	0	0	0	
	0-5				0	0			0	0			0	0	0	0	
	6-15				0	0			0	0			0	0	0	0	
	6-15				0	0			0	0			0	0	0	0	
	6-15				0	0			0	0			0	0	0	0	
	16-40				0	0			0	0			0	0	0	0	
	16-40				0	0			0	0			0	0	0	0	
	16-40				0	0			0	0			0	0	0	0	
	40 -				0	0			0	0			0	0	0	0	
1,1 - 4	0-5				0	0			0	0			0	0	0	0	
	0-5				0	0			0	0			0	0	0	0	
	0-5				0	0			0	0			0	0	0	0	
	6-15				0	0			0	0			0	0	0	0	
	6-15				0	0			0	0			0	0	0	0	
	6-15				0	0			0	0			0	0	0	0	
	16-40				0	0			0	0			0	0	0	0	
	16-40				0	0			0	0			0	0	0	0	
	16-40				0	0			0	0			0	0	0	0	
	40 -				0	0			0	0			0	0	0	0	

Figur 6. Data for nettilsluttede motorer

Elforbruget og besparelsen ved reduktion af spændingen bliver beregnet på baggrund af de mulige spændingsreduktioner (se figur 3) og motorenes spændingsafhængighed, opgjort som effektreduktion i % ved 1 % lavere spænding (se figur 7).

**Data om motorer, hvis elforbrug er spændingsafhængigt**

**Udstyrets spændingsafhængighed, opgjort som effektreduktion i % ved 1% lavere spænding:**

Asynkronmotor	Motorbelastning, %				
	Mærkeeffekt, kW	0-5	6-15	16-40	40-
0-1,0		2,0	1,4	0,7	0,2
1,1-4,0		1,7	0,9	0,3	0,0
4,1-15,0		1,4	0,6	0,1	0,0
15,1-100		1,1	0,5	0,1	0,0
101-		1,0	0,4	0,1	0,0

Figur 7. Motorers spændingsafhængighed, opgjort som effektreduktion i % ved 1 % lavere spænding

### Elvarmelegemer

I værktøjet kan der indtastes data for elvarmelegemer uden temperaturstyring.

I figur 8 er vist inddateringsfelterne. Som det ses skal der indtastes varmelegemernes mærkeeffekter, antal, belastning (dvs. effektoptag) og driftstid for de forskellige spændingsniveauer (markeret med lilla).

**Elvarmelegemer uden temperaturstyring:**

Varmelegemernes mærkeeffekt kW	Antal	Periode 1				Periode 2				Periode 3				Sum periode 1-3		Bemærkninger
		Belastning kW	Driftstid h/år	Elforbrug kWh/år	Besparelse kWh/år	Belastning kW	Driftstid h/år	Elforbrug kWh/år	Besparelse kWh/år	Belastning kW	Driftstid h/år	Elforbrug kWh/år	Besparelse kWh/år	Elforbrug kWh/år	Besparelse kWh/år	
				0	0			0	0			0	0	0	0	
				0	0			0	0			0	0	0	0	
				0	0			0	0			0	0	0	0	
				0	0			0	0			0	0	0	0	
				0	0			0	0			0	0	0	0	
				0	0			0	0			0	0	0	0	
				0	0			0	0			0	0	0	0	
				0	0			0	0			0	0	0	0	
				0	0			0	0			0	0	0	0	
				0	0			0	0			0	0	0	0	
				0	0			0	0			0	0	0	0	
				0	0			0	0			0	0	0	0	
				0	0			0	0			0	0	0	0	
Sum af varmelegemer		0		0	0			0	0			0	0	0	0	

Figur 8. Data for elvarmelegemer

Elforbruget og besparelsen ved reduktion af spændingen bliver beregnet på baggrund af de mulige spændingsreduktioner (se figur 3) og elvarmelegemernes spændingsafhængighed, opgjort som effektreduktion i % ved 1 % lavere spænding (se figur 9).

Data om elvarmelegemer, hvis elforbrug er spændingsafhængigt

Udstyrets spændingsafhængighed, opgjort som effektreduktion i % ved 1% lavere spænding:

Elvarmelegemer	Effektreduktion i %
Varme, der ikke reguleres	1,9

Figur 9. Elvarmelegemers spændingsafhængighed, opgjort som effektreduktion i % ved 1 % lavere spænding

#### 4.2 Resultater

På baggrund af indtastningerne, beskrevet i foregående afsnit, bliver besparelsen for op til tre spændingsniveauer (angivet som periode 1 - 3 i figur 10) beregnet. Endvidere bliver den samlede besparelse beregnet (markeret med blå).

Elforbrug til lyskilder, motorer og elvarmelegemer efter spændingsreduktionen bliver beregnet. Elforbruget angives både i årligt elforbrug og i procent (markeret med rødt).

Resultater:

	Periode 1		Periode 2		Periode 3		Sum periode 1-3		Bemærkninger
	Elforbrug kWh/år	Besparelse kWh/år	Elforbrug kWh/år	Besparelse kWh/år	Elforbrug kWh/år	Besparelse kWh/år	Elforbrug kWh/år	Besparelse kWh/år	
Lyskilder	102.672	22.336	34.202	4.722	0	0	136.874	27.058	0
Motorer	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Varme	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ialt	102.672	22.336	34.202	4.722	0	0	136.874	27.058	

Data til lagkage:	kWh/år	%
Lyskilder efter besparelsen	109.816	78,6
Elbesparelse, lyskilder	27.058	19,3
Motorer efter besparelsen	0	0,0
Elbesparelse, motorer	0	0,0
Varme efter besparelsen	0	0,0
Elbesparelse, varme	0	0,0
Elforbrug, der ikke påvirkes	3.526	2,5

Elforbrug og besparelser

Figur 10. Resultater

#### 4.3 Økonomi inkl. serviceudgifter

En virksomhed, der overvejer at installere et anlæg til spændingsstyring, har brug for at få udarbejdet et tilbud, som indeholder beregninger af levetidsomkostningerne (LCC-beregning) forbundet med installation og drift af anlægget.

Med værktøjet er det muligt at foretage en beregning af levetidsomkostningerne. I beregningen indgår de samlede omkostninger til investering og installation samt driftsomkostningerne til energiforbrug samt service og vedligeholdelse i hele anlæggets levetid.

Virksomheder bør få udarbejdet et tilbud med beregninger af levetidsomkostningerne for to alternative anlæg, hvilket vil danne et godt beslutningsgrundlag for kunden. Tilbuddet vil således vise, hvilken løsning der giver kunden mest for pengene (i hele anlæggets levetid).

Økonomi (levetidsomkostninger):		
<b>Anlægsudgifter</b>		
Anlægspris ( $C_{ic}$ )	[Kr.]	<input type="text"/>
<b>Levetid og energipris</b>		
Anlæggets levetid	[år]	<input type="text"/>
Energipris	[Kr./kWh]	<input type="text"/>
<b>Driftsudgifter</b>		
Energiforbrug	[kWh/år]	<input type="text"/>
Energiomkostninger i alt i anlæggets levetid [ $C_e$ ]	[Kr.]	<input type="text"/>
<b>Service og vedligehold</b>		
Service- og vedligeholdelsesomkostninger i anlæggets levetid [ $C_m$ ]	[Kr.]	<input type="text"/>
<b>LCC - Life Cycle Cost (levetidsomkostninger)</b>		
$LCC = C_{ic} + C_e + C_m$	[Kr.]	<input type="text" value="0"/>

Figur 11. Økonomi (levetidsomkostninger)

#### 4.4 Vurdering af resultaterne

Inden der træffes beslutning om spændingssænkning bør det vurderes, om besparelsen – eller dele af den – bedre opnås ved f. eks. at renovere eller forny belysningen eller ved at udskifte lavt belastede motorer med mindre motorer eller ved at styre motorer med frekvensomformere. Det er nærmere beskrevet i afsnit 10.

Der bør også foretages en vurdering af de afledede effekter, som kan være længere levetid for udstyret, mindre vedligehold o. lign., se afsnit 8. Pengebesparelsen ved disse afledede effekter opgøres om muligt.

## **Del II. Generel beskrivelse af spændingsstyring**

Del II omfatter baggrundsinformation til værktøjet i form af en generel beskrivelse af en række forhold, startende med spændingsforholdene hos forbrugerne, efterfulgt af en kort omtale af udstyr til spændingsstyring og af det elforbrugende udstyrs spændingsafhængighed. Herefter omtales nogle vigtige forhold ud over økonomien, som også bør tages i betragtning, og der beskrives, hvordan de faktisk opnåede besparelser kan opgøres.

Der peges også på, at der findes alternative besparelsesmuligheder, som eventuelt kan være mere fordelagtige på længere sigt. Endelig gives nogle gode råd, der kan bruges som en form for checkliste i en konkret opgave.

### **5. Spændingsforholdene hos elforbrugerne**

#### **5.1 Leveringsspænding**

Standardspændingen i danske lavspændingsnet er 230 V mellem fase og nul svarende til 398 V mellem faserne (yderspændingen). Under normale driftsforhold må spændingen på det sted, hvor kundens installation er tilsluttet elforsyningsnettet, ikke afvige mere end  $\pm 10\%$  fra de 230 V. Den skal således ligge i intervallet 207-253 V svarende til en yderspænding på 359-438 V. Det er DS/EN 50160 "Karakteristika for spændingen i offentlige elektricitetsforsyningsnet" (ref. 1) og DEFU Rekommandation 16, "Spændingskvalitet i lavspændingsnet" (ref. 2), der fastsætter dette.

Elselskaberne søger typisk at holde mellem 230 V og 240 V på lavspændingssiden af 10/0,4 kV transformerne. Spændingen i kundens tilslutningspunkt afhænger af, hvor stærkt netter fra transformeren til tilslutningspunktet er, samt af den aktuelle belastning i elnettet. Den kan derfor normalt være fra 240 V til den nedre grænse på 207 V og i enkelte tilfælde også lavere. Der er ingen statistik over den gennemsnitlige leveringsspænding hos alle landets elforbrugere, men nogle stikprøver tyder på, at den ligger omkring 228 V svarende til 395 V yderspænding.

Standardspændingen på 230 V blev indført i Danmark og i det meste af Europa i 1995 som et kompromis mellem de 220 V, der tidligere gjaldt på det europæiske fastland, og Storbritanniens 240 V.

#### **5.2 Spændingen i installationerne**

Spændingsfaldet i de fleste installationer er ret beskedent, men det kan dog i større installationer blive op til og også over de 4%, som Stærkstrømsbekendtgørelsen (afsnit 6, punkt 525) anbefaler i praksis ikke overstiges. Spændingen på et forbrugssted kan således være 9 V lavere end leveringsspændingen eller helt ned til 198 V (343 V yderspænding), i sjældne tilfælde endda lavere. Kan apparaterne ikke fungere tilfredsstillende ved spændinger under 207 V, må man fastlægge spændingssænkningen, så leveringsspændingen ikke kommer under de 207 V plus installationens spændingsfald. Er spændingsfaldet 4%, skal leveringsspændingen mindst være 216 V.

Spændingen ved forbrugsstederne kan variere meget som følge af varierende belastninger i nettet samt omkoblinger og spændingsjusteringer i de overordnede forsyningsnet. Variationer på 10-15 V inden for et døgn svarende til 4-6% er ikke ualmindelige.

#### **5.3 Usymmetri og harmoniske**

Er spændingen usymmetrisk og/eller indeholder den harmoniske, medfører det øgede tab i installationen, og det kan også betyde, at elmotorer m.v. ikke kan belastes 100%.

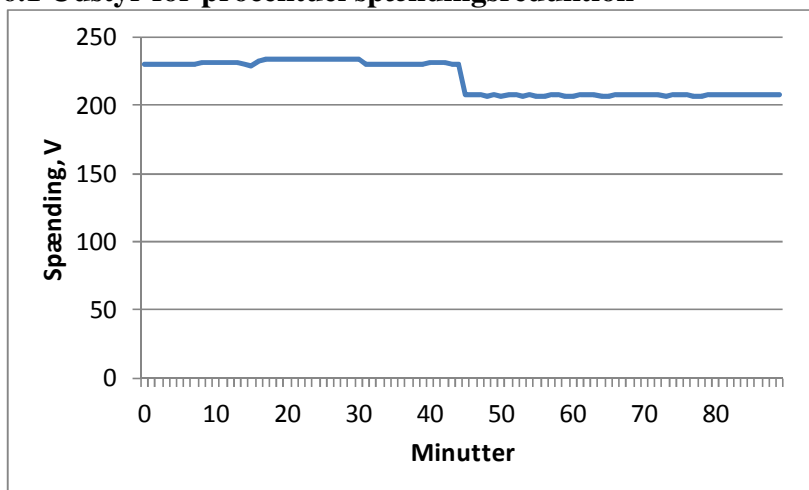
Som hovedregel er forsyningsspændingen symmetrisk eller næsten symmetrisk, idet usymmetrier skal være under 2% i henhold til DEFU rekommandation 16 (ref. 2). Også spændingerne i installationerne er som hovedregel næsten symmetriske, dog bærer nogle installationer præg af, at installatørerne helst sætter de enfasede belastninger på fase L1 med det resultat, at spændingen i denne fase kan være nogle volt lavere end de to andre fasespændinger.

De harmoniske spændinger og strømme er især 3., 5., 7., 9. og 11. harmoniske. Den 3. harmoniske medfører tab i nullederen og kan overbelaste denne. De harmoniske medfører også tab i kabler og motorer, men kun hvis de overstiger grænseværdien i henhold til DEFU rekommandation 16 (ref. 2), kan det give væsentlige problemer i installationen.

## 6. Udstyr til spændingsstyring

Udstyret kan opdeles i udstyr, der sænker spændingen med en bestemt, forud valgt procentsats, og udstyr, der kan fastholde en valgt, lavere spænding.

### 6.1 Udstyr for procentuel spændingsreduktion



Figur 12. Fasespændingen før/efter indkobling af det spændingssænkende udstyr

Denne type udstyr tilbydes af alle de leverandører, der er medtaget i bilag 1. Udstyret kan sænke spændingen med en bestemt procentsats, f. eks. kan der vælges mellem 4, 6, 8 og 10% spændingssænkning. I sin simple form er der tale om autotransformere, men der findes også udstyr på markedet, som er mere avanceret teknisk set, og som kan have både en sekundær og en tertiær vikling til begrænsning (men ikke fuldstændig fjernelse) af usymmetri og harmoniske i spændingen.

Elforbrugere med egen 10/0,4 kV transformer har også den mulighed at sænke spændingen med transformerens trinkobler. Trinkobleren har typisk fem trin svarende til yderspændinger på 380, 390, 400, 410 og 420 V ved 10 kV spænding på primærsiden. Står transformeren ikke allerede i nederste trin, er det således muligt at sænke spændingen 2,5% eller mere. Spændingen kan dog sjældent sænkes helt så meget, som den kan med det særlige spændingssænkende udstyr.



Tabene i udstyret for procentuel spændingssænkning – for trinkobleren de ekstra transformertab – er meget små, under 1%.

## 6.2 Udstyr for fastholdt spænding

Udstyret kan sænke spændingen til et fast niveau, som elforbrugeren vælger. Det er elektronisk udstyr – ofte betegnet AVC, Automatic Voltage Control – der typisk vil have en række andre funktioner, herunder at kunne fjerne harmoniske og usymmetrier. Udstyret betegnes også som "den aktive type" af spændingssænkende udstyr.

Tabene i denne type udstyr er større end for udstyret med procentuel spændingsreduktion. Tabene kan eksempelvis være 3% af den omsatte energi.

## 6.3 Tilslutning af udstyret

Det spændingssænkende udstyr tilsluttes på lavspændingssiden af installationen. Ønskes hele installationen spændingsstyret, tilsluttes udstyret i hovedtavlen eller på sekundærsiden af transformeren. Ellers tilsluttes det i den tavle, der forsyner det udstyr, der ønskes styret. Installationen skal være afbrudt, når udstyret tilsluttes.

Hvis ikke alle de elektriske apparater fungerer tilfredsstillende ved den ønskede lavere spænding, kan det blive nødvendigt at indsætte spændingshævende udstyr foran de pågældende apparater.

# 7. Apparaters spændingsafhængighed

## 7.1 Lyskilder

Målinger på glødelamper, lysstofrør med konventionel forkobling og damplamper med konventionelle forkoblinger viser, at effektoptaget (og lysstrømmen) falder, når spændingen reduceres. For lysstofrør og kompaktlysstofrør med elektroniske forkoblinger (HF) forbliver effektoptaget (og lysstrømmen) konstant, når spændingen sænkes. Også for LED lyskilder og damplamper med elektroniske forkoblinger er effektoptaget og lysstrømmen uændret, når spændingen sænkes.

I tabel 3 ses effektreduktioner i % pr. % lavere spænding for forskellige lyskilder ifølge ref. 3. Tabellen viser også faldet i lysniveau som følge af spændingssænkningen..

Lyskilder	Effektreduktion i % pr. % lavere spænding	Fald i lysniveau i % pr. % lavere spænding
Glødelamper	1,5	3,0
Lysstofrør med konventionel forkobling	2,0	1,7
Lysstofrør med elektronisk forkobling	0,0	0,0
Kompaktlysstofrør med konventionel forkobling	1,8	1,1
Kompaktlysstofrør med elektronisk forkobling	0,0	0,0
Kviksølvdamplamper med konventionel forkobling	2,0	2,2
Kviksølvdamplamper med elektronisk forkobling	0,0	0,0
Højtryksnatriumdamplamper med konventionel forkobling	2,0	2,0

Højtryksnatriumdamplamper med elektronisk forkobling	0,0	0,0
Metalhalogenlamper med konventionel forkobling	2,0	2,0
Metalhalogenlamper med elektronisk forkobling	0,0	0,0
LED lyskilder	0,0	0,0

Tabel 3. Lyskilders spændingsafhængighed (ref. 3)

## 7.2 Motorer

Målinger på direkte forsynede (nettilsluttede) 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.

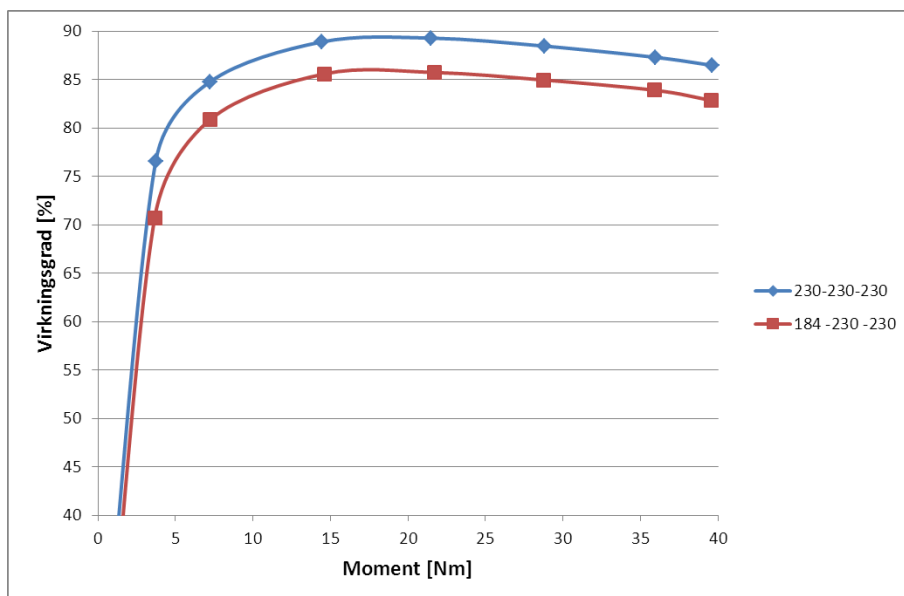
I tabel 4 ses effektreduktioner i % pr. % lavere spænding ved forskellige motorbelastninger (belastningsgrader).

Asynkronmotor	Motorbelastning i %			
	0-5	6-15	16-40	40-
Mærkeeffekt, kW				
0-1,0	2,0	1,4	0,7	0,2
1,1-4,0	1,7	0,9	0,3	0,0
4,1-15,0	1,4	0,6	0,1	0,0
15,1-100	1,1	0,5	0,1	0,0
101-	1,0	0,4	0,1	0,0

Tabel 4. Motorers spændingsafhængighed vist som effektreduktion i % pr. % spændingssænkning (ref. 4)

## Usymmetrisk spænding

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 (7% spændingsusymmetri), er den maksimale virkningsgrad målt for en 5,5 kW motor til 86 % mod 89% ved en symmetrisk spænding på 398 V (ref. 4). I stort set hele momentområdet var effektoptaget 4 – 5 %, lavere ved den symmetriske spænding.



Figur 13. Virkningsgrader for en 4-polet 5,5 kW EFF1 motor ved symmetrisk og usymmetrisk spænding som funktion af momentet

### Drift med frekvensomformer

Målingerne på en 4 kW motor, der forsynes via frekvensomformer, viser, at virkningsgraden for motoren inklusive omformer er næsten uafhængig af spændingen og af eventuelle usymmetrier i spændingsforsyningen til frekvensomformer. Kun ved frekvenser på eller nær 50 Hz er der en svag spændingsafhængighed. Den er dog så svag, at der ved identificering af besparelspotentialer ved reduktion af spændingen kan ses bort fra motorer med frekvensomformer.

### 7.3 Varmelegemer

Den elektriske effekt, der afsættes i en modstand, er proportional med spændingen i anden potens. Reduceres spændingen med 10%, falder effekten med 19%. De 19% forudsætter dog, at modstanden er uændret, hvilket ikke nødvendigvis er tilfældet, da lavere temperatur betyder lavere modstand. (Dette forhold er årsagen til, at effektreduktionen i tabel 3 er angivet til 15% for glødepærer og ikke 19%).

Udstyr	Effektreduktion i % pr. % lavere spænding
Varmelegemer, radiatorer mv., styret med f. eks. termostat	1,9 (men tilsvarende længere driftstid)
Varmelegemer, radiatorer mv. uden styring	1,9

Tabel 5. Varmelegemer, radiatorer m.v.

### 7.4 Elektronik og andet

#### Switch-mode strømforsyninger

Tabel 6 viser målinger på en switch-mode strømforsyning med en nominel afgiven effekt på 30 W, tilsluttet en bærbar computer. Der er målt ved den nominelle spænding på 230 V samt ved øvre og nedre grænse ( $230\text{ V} \pm 10\%$ ). Desuden er målt ved 100 V, som på strømforsyningen var angivet som den laveste spænding, enheden kunne tilsluttes. Det ses, at den optagne effekt P er praktisk taget konstant ved alle de efterprøvede spændingsniveauer.

U [V]	U [%]	I [A]	I [%]	P [W]
100	44	0,421	200	29,7
207	90	0,231	110	29,6
230	100	0,211	100	29,7
253	110	0,198	94	29,8

Tabel 6. Switch-mode strømforsyning

Da det meste elektroniske udstyr i dag er forsynet med switch-mode strømforsyninger, kan der i opgørelsen af besparelspotentialer ved reduktion af spændingen ses bort fra dette udstyr.

## 8. Vigtige forhold ud over økonomien

Økonomien er selvfølgelig helt afgørende for, om det er interessant at spændingsstyre en installation, ligesom det er helt afgørende, at nedgangen i lysniveau er acceptabelt. Men der er også en række andre forhold, som skal tages i betragtning. De forhold er omtalt i dette afsnit.

### 8.1 Reduktion af spændingsvariationer

Anvendes udstyr med fast udgangsspænding, vil spændingen ved de enkelte apparater kun variere med spændingsfaldet i den spændingsstyrede installation. Variationerne i spændingen vil dermed i de fleste installationer være højst 3-4%. Det vil især kunne få betydning fremover, hvor der kan forventes store udsving i forsyningsspændingen til lavspændingsinstallationer som følge af varierende decentral produktion (solceller, vindmøller mv.) og stærkt varierende forbrug (eksempelvis opladning af elbiler).

### 8.2 Levetid og vedligeholdelseskostninger

For spændingsfølsomme belysningsanlæg betyder en lavere spænding at lysstrømmen reduceres. For ældre lyskilder øges levetiden dermed, mens der for moderne lyskilder ikke kan siges noget generelt om levetidens spændingsafhængighed.

Lavere spænding til en direkte forsynet asynkronmotor betyder større tab i motoren, hvis denne er belastet mere end omkring 50%. Driftstemperaturen stiger, og levetiden må forventes at blive reduceret. Sænkes spændingen 10%, vil temperaturstigningen i statorviklingen i et eksempel med fuldt belastede motorer i ref. 5 stige fra 70 °C til 80-85 °C, hvilket betyder kortere levetid for motoren. For lavt belastede motorer betyder lavere spænding, at tabene mindskes, men da driftstemperaturen i forvejen er lav, får det ingen væsentlig indflydelse på levetiden.

I elektronisk udstyr vil en lavere spænding betyde, at strømmen stiger, og dermed stiger også tabene, hvilket kan medføre kortere levetid.

De vedligeholdelseskostninger, der påvirkes af en spændingssænkning, er primært omkostningerne til udskiftning af lyskilder og motorer. Disse omkostninger påvirkes som foran nævnt for levetiden.

### 8.3 Leverandørgarantier

Som udgangspunkt må det forventes, at alt udstyr kan fungere i hele standardens spændingsområde 207-253 V. Leverandøren kan dog specificere et snævrere interval, og

derfor bør det undersøges, om udstyrsgarantien gælder ved den lavere spænding. Det bør også vurderes, om spændingstab i forsyningskablerne betyder, at den faktiske driftsspænding bliver væsentligt under standardens nedre grænse på 207 V.

#### **8.4 Motorers omløbstal**

Direkte forsynede asynkronmotorer vil køre en smule langsommere, når spændingen sænkes. Slippet - forskellen mellem motorens hastighed og den synkron hastighed - vil blive 20-25% større, hvis motorspændingen sænkes 10%. En fuldt belastet 22 kW motor, der ved en yderspænding på 400 V kører 2940 o/min., vil køre ca. 2925 o/min. eller 0,5% langsommere, hvis spændingen sænkes til 360 V. Når en motor kører langsommere, falder ydelsen, men normalt vil der være uden praktisk betydning.

#### **8.5 Motorers startmoment**

Direkte forsynede asynkronmotorers startmoment (og øvrige momentkurve) vil falde, når spændingen sænkes. Momentet er omtrent proportionalt med spændingens kvadrat, og startmomentet falder således ca. 19% ved en 10% spændingssænkning. Det vil forlænge motorens opstarttid, og det kan i værste fald – hvis motorens moment under opstarten bliver lavere end belastningens moment – betyde, at motoren går i stå under starten.

#### **8.6 Motorers fuldlast**

Direkte forsynede asynkronmotorers optagne strøm stiger, når spændingen sænkes. Det gælder for motorer belastet over ca. 50% og forudsat, at momentet holdes uændret. Stigningen vil være lidt mindre end spændingsreduktionen, da  $\cos\phi$  forbedres ved den lavere spænding.

Det kan blive nødvendigt at "derate" motoren, når den forsynes med en lavere spænding end mærkespændingen.

#### **8.7 Netbelastninger**

Hvis det spændingssænkende udstyr hovedsageligt forsyner spændingsfølsomme lyskilder og lavt belastede, direkte forsynede asynkronmotorer, vil strømmen i lavspændingsnettet falde ved en spændingssænkning, og tabene i nettet vil dermed også falde.

Udgør spændingsfølsomme lyskilder og lavt belastede, direkte forsynede asynkronmotorer kun en mindre del af den samlede belastning, vil kablerne derimod belastes kraftigere ved den lavere spænding. Nettabene vil således stige, og nettes overføringskapacitet mindskes.

#### **8.8 Transformerbelastninger**

Transformerbelastningen falder, hvis netbelastningen falder - og omvendt. Benyttes 10/0,4 kV transformerens trinkobler til at sænke spændingen i lavspændingsnettet, vil transformertabene stige. Sænkes spændingen 5%, vil tabene blive øget med ca. 0,1% af transformerens mærkeeffekt, forudsat transformeren er 100% belastet. Falder belastningen i lavspændingsnettet, når spændingen sænkes, bliver tabsforøgelsen mindre – eventuelt opnås en lille besparelse i transformertabene.

#### **8.9 Kortslutningseffekt**

Kortslutningseffekten og kortslutningsstrømmen bliver lavere i et lavspændingsnet, hvor spændingen sænkes. Det er derfor nødvendigt at undersøge, om der er selektivitet mellem nettets beskyttelsesudstyr, også ved den lavere netspænding.

## 8.10 Spændingsdyk

Generende dyk i forsyningsspændingen kan blive mere generende, når spændingen sænkes i lavspændingsnettet. Dykkenes procentvise størrelse ændres ikke, men i absolutte tal (volt) bliver spændingen lavere i dykkene, og der kan forekomme flere udfald end ellers.

Udstyr med fast udgangsspænding vil – afhængig af typen - kunne klare mange af de situationer, som ellers forårsager problemer med apparaterne i en installation.

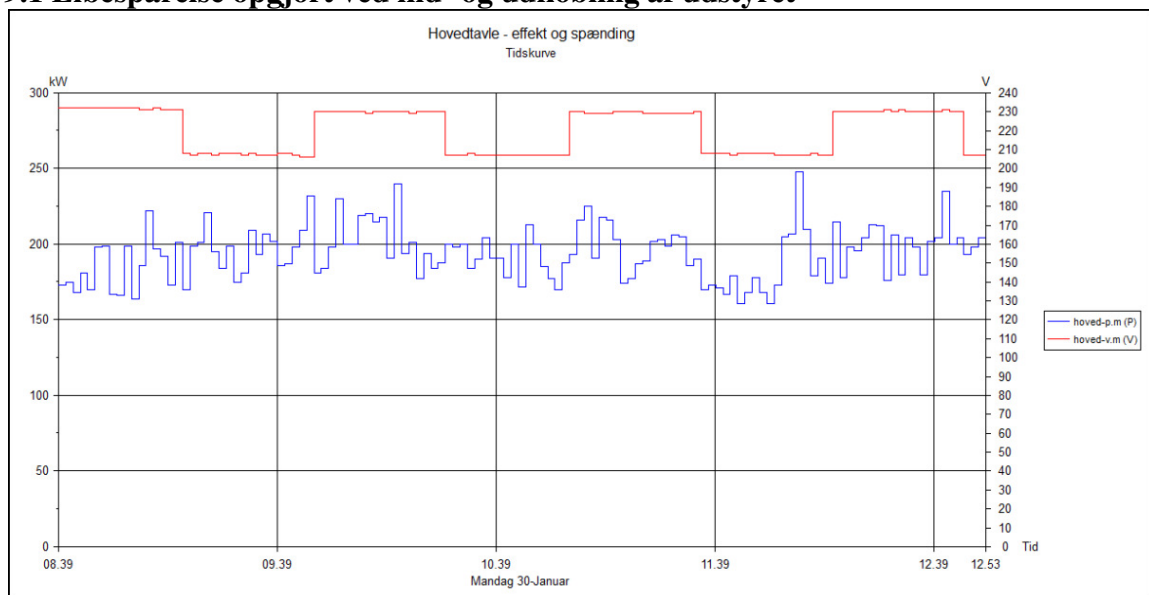
## 8.11 Utilstøttet start af nødforsyningsanlæg

Et lavere spændingsniveau kan medføre utilstøttet indkobling af UPS-anlæg eller dieselanlæg, fordi styringen opfatter en ekstra lav spænding som udtryk for, at elforsyningen svigter. Det kan løses ved at justere set-punkterne for nødforsyningsanlæggene.

## 9. Kontrol af elbesparelsen

Efter installation af det spændingssænkende udstyr bør elbesparelsen opgøres for at vurdere, om den forventede besparelse er opnået. Besparelsen kan opgøres ved at måle elforbruget med og uden spændingssænkning. Den kan også opgøres ved at sammenligne elforbruget i en repræsentativ periode efter udstyrets idriftsættelse med elforbruget i en tilsvarende periode før.

### 9.1 Elbesparelse opgjort ved ind- og udkobling af udstyret



Figur 14. Elforbrugsmåling med skiftevis ind- og udkobling af det spændingssænkende udstyr

Det spændingssænkende udstyr indkobles og udkobles med faste, korte intervaller igennem en periode på helst ikke under to uger, hvor belastningen på det elforbrugende udstyr er repræsentativ. Spændingen og områdets elforbrug registreres elektronisk med kort opløsningsstid, se eksemplet figur 14. Den umiddelbare elbesparelse kan derefter bestemmes som forskellen mellem elforbruget i alle intervallerne med spændingssænkning og elforbruget i alle intervallerne uden:

Elbesparelse (kWh) =  $\Sigma(\text{elforbrug ved almindelig spænding}) - \Sigma(\text{elforbrug ved lav spænding})$

Elbesparelse (%) =  $\text{Elbesparelse (kWh)} \cdot 100 / \Sigma(\text{elforbrug ved almindelig spænding})$

Målingerne af elforbruget skal ske med høj opløsning, både hvad angår elforbruget og tiden. Målingerne skal inkludere det spændingssænkende udstyr, så udstyrets tab modregnes i

besparelsen. Intervalllængden (tiden mellem ind-/udkobling af det spændingssænkende udstyr) skal være et multiplum af måletiden og bør være ret kort, f. eks. 10-20 minutter, således at der kun er mindre ændringer i de ydre forhold (produktion, lysindfald osv.) fra interval til interval. Eventuelt vælges en skæv intervalllængde, eksempelvis 17 minutter, så måleintervallerne ikke starter samtidig hver dag.

Det er nødvendigt at kontrollere, om der er udstyr, som falder ud, når spændingen sænkes. Som eksempel kan natriumdamplamper falde ud, og er de kun inde i intervallerne med almindelig spænding, fås et forkert resultat af besparelserne. Udstyr kan også falde ud kortvarigt. Kan man ikke udelukke det, bør man i analysen fjerne de første målinger, eksempelvis fra det første minut, i hvert måleinterval.

Ved målingerne bør eventuelle termiske belastninger som ovne, kogeplader og radiatorer holdes uden for, da de vil belaste mindre, når spændingen sænkes, og således vil give en besparelse i analysen, selv om der reelt ikke spares noget på disse belastninger.

Det kan være nyttigt at supplere hovedmålingen med bimålinger på elforbrugende udstyr, der betragtes som særligt interessant, således at man kan se, hvor og under hvilke forhold besparelsen opnås.

## 9.2 Statistisk analyse af målte elforbrug

De i afsnit 9.1 målte elforbrug er forbundet med en vis usikkerhed, som bør tages i betragtning, når elbesparelsen vurderes som differensen mellem elforbruget ved almindelig spænding og elforbruget ved lav spænding. Usikkerheden på elforbrugene kan vurderes med t-statistik metoden, idet det forudsættes, at elforbrugene er binomialfordelt. t-statistik metoden anbefales blandt andet af de australske energimyndigheder (ref. 6).

Ved t-statistik metoden vælges det konfidensniveau (den sandsynlighed), som elforbruget ønskes bestemt med. Det interval – kaldet konfidensintervallet - inden for hvilken den sande værdi af elforbruget formodes at ligge, kan herefter beregnes. I beregningerne indgår de statistiske størrelser middelværdi, varians, standardafvigelse og standard fejl:

$$\text{middelværdi } \bar{Y} = \frac{\sum Y_i}{n}$$

hvor  $Y_i$  er de individuelle data (de enkelte målinger af elforbrug med kort opløsningstid), og  $n$  er antallet af data i serien (dvs. af målinger med kort opløsningstid).

$$\text{Varians } S^2 = \frac{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}{n - 1}$$

$$\text{Standardafviselse } s = \sqrt{S^2}$$

$$\text{Standard fejl } SE = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

$$\text{Absolut præcision} = t \times SE, \quad \text{Relativ præcision} = \frac{t \times SE}{\bar{Y}} \times 100\%$$

hvor værdien af  $t$  findes i tabellen nedenfor ud fra det valgte konfidensniveau. Ved det valgte konfidensniveau vil den sande værdi af elforbruget ligge i intervallet:

$$\text{Sand værdi af elforbrug} = \bar{Y} \mp t \times SE$$

n-1	Konfidensniveau i %							
	60	75	90	95	97,5	99	99,5	99,95
1	1,376	2,414	6,314	12,706	25,452	63,657	127,3	1273,2
2	1,061	1,604	2,920	4,303	6,205	9,925	14,089	44,705
3	0,978	1,423	2,353	3,182	4,177	5,841	7,453	16,326
4	0,941	1,344	2,132	2,776	3,495	4,604	5,598	10,306
5	0,920	1,301	2,015	2,571	3,163	4,032	4,773	7,976
6	0,906	1,273	1,943	2,447	2,969	3,707	4,137	6,788
7	0,896	1,254	1,895	2,365	2,841	3,499	4,029	6,082
8	0,889	1,240	1,860	2,306	2,752	3,355	3,833	5,617
9	0,883	1,230	1,833	2,262	2,685	3,250	3,690	5,291
10	0,879	1,221	1,812	2,228	2,634	3,169	3,581	5,049
11	0,876	1,214	1,796	2,201	2,593	3,106	3,497	4,863
12	0,873	1,209	1,782	2,179	2,560	3,055	3,428	4,716
13	0,870	1,204	1,771	2,160	2,533	3,012	3,372	4,597
14	0,868	1,200	1,761	2,145	2,510	2,977	3,326	4,499
15	0,866	1,197	1,753	2,131	2,490	2,947	3,286	4,417
16	0,865	1,194	1,746	2,120	2,473	2,921	3,252	4,346
17	0,863	1,191	1,740	2,110	2,458	2,898	3,222	4,286
18	0,862	1,189	1,734	2,101	2,445	2,878	3,197	4,233
19	0,861	1,187	1,729	2,093	2,433	2,861	3,174	4,187
20	0,860	1,185	1,725	2,086	2,423	2,845	3,153	4,146
30	0,854	1,173	1,697	2,042	2,360	2,750	3,030	3,902
uendelig	0,842	1,150	1,645	1,960	2,241	2,576	2,807	3,481

Tabel 7. t-værdier i afhængighed af antal målinger (n) minus 1 og af det valgte konfidensniveau

t-statistik metoden er som udgangspunkt beregnet til dataserier med forholdsvis få data, men kan også fint anvendes til dataserier med mange data, hvor (n-1) i tabellen ovenfor ligger mellem 30 og uendelig, og de tilsvarende værdier af t må estimeres ud fra tabellens to sidste linier.

### 9.3 Elbesparelsen opgjort ud fra elforbrug før og efter idriftsættelsen

Ved denne metode opstilles en såkaldt baseline, dvs. et udtryk for elforbruget som funktion af alle væsentlige parametre så som mængden og arten af produkter, udetemperatur mv. (ref. 6). Udtrykket opstilles ved regressionsanalyse af eksempelvis døgn-elforbruget igennem året forud for udstyrets idriftsættelse. Om muligt begrænses analysen til elforbruget i de områder, hvor spændingen skal sænkes. Elforbruget måles i de første måneder efter udstyrets idriftsættelse, og baseline beregnes (baseline vil være et udtryk for elforbruget, således som det ville have været, hvis besparelsen ikke var gennemført). Forskellen mellem baseline og det faktiske elforbrug er elbesparelsen, forudsat der ikke er gennemført andre besparelser i perioden.

Metoden er meget afhængig af, at der kan opstilles et pålideligt udtryk for elforbruget, hvor alle relevante parametre indgår. Dens brugbarhed afhænger også af, at baseline kan opstilles med meget stor sikkerhed, og at der ikke sker andre begivenheder, som påvirker elforbruget. Eksempelvis kan installationen af det spændings-sænkende udstyr øge medarbejdernes opmærksomhed på elforbruget og medføre en midlertidig vækst i adfærdsmæssige besparelser.



Sænkes spændingen med transformerens trinkobler, er det ikke muligt at hæve og sænke spændingen med korte mellemrum som vist i figur 14. Derfor må besparelsen fastlægges som beskrevet ovenfor, men resultatet må tages med et gran salt.

## **10. Alternative besparelsmuligheder**

### **10.1 Den bedste løsning?**

Spændingsstyring kan være den lette løsning, når der ønskes at spare på elenergien, men det er ikke altid den bedste løsning. Inden der vælges spændingsstyring, bør det derfor overvejes, om ikke der kan spares meget mere energi ved eksempelvis at renovere eller udskifte belysningen eller ved at udskifte lavt belastede motorer med mindre motorer.

Et regnestykke vil måske vise, at tilbagebetalingstiden er kortest med spændingsstyring. Men besparelserne kan være langt større, hvis der investeres i et helt moderne belysningsanlæg og i optimerede motorer. Og så får man helt nyt udstyr, som kan holde i mange år.

### **10.2 Belysningsanlæg**

Udskiftes et ældre belysningsanlæg med T8-rør og konventionelle forkoblinger med et anlæg med T5-lysstofrør, dæmpbare spoler, bevægelsesmeldere og dagslysstyring er det muligt at reducere elforbruget med op til 82% (ref. 7). Det er langt mere end de 20%, der måske forventes ved en spændingssænkning på 10%. Tilbagebetalingstiden vil godt nok være noget længere end for løsningen med spændingssænkning, men til gengæld får man et helt nyt anlæg med et højt lysniveau.

Der kan være mange andre løsninger, som måske er knapt så gennemgribende, og alle disse muligheder bør overvejes, før der eventuelt vælges en løsning med spændingssænkning.

### **10.3 Motorer**

Er der tale om motorer med permanent lav belastning, bør det overvejes at udskifte dem med mindre motorer. Er motoren ikke altid belastet lavt, kan en hastighedsregulering – eksempelvis med frekvensomformer – være løsningen, som samtidig giver flere muligheder for at spare energi, end spændingsstyringen vil gøre.

## **11. Gode råd**

Spændingsstyring er en nem måde at spare elenergi på, hvis der er mange lyskilder med konventionelle forkoblinger og eventuelt også mange lavt belastede, direkte forsynede motorer.

Overvej nøje, om der er alternative muligheder at spare el på, som er bedre end spændingssænkningen.

Vurder, om leverandørgarantier påvirkes af en spændingssænkning.

Begræns spændingssænkningen til de dele af installationen, hvor der kan opnås besparelser.

Vurder, om det er bedst at lave en central løsning eller en decentral.

Brug "Værktøj til analyse af spændingsstyring" til at kortlægge potentialet for elbesparelser, så risikoen for fejlinvesteringer mindskes.

Lysniveauet falder, når spændingen sænkes. Vurder, om det lavere lysniveau kan accepteres – nu og fremover.

På motorsiden spares der kun på lavt belastede, direkte forsynede asynkronmotorer. Potentialer er lille, hvis der kun er få sådanne motorer og/eller driftstiden er kort.

Vurder, om besparelsen kan opnås helt eller delvis ved at sænke spændingen med transformerens trinkobler.

Vælges spændingssænkende udstyr med fast udgangsspænding, mindskes problemer med for lav spænding og med spændingsdyk.

Damplamper kan gå ud ved lave spændinger.

Kontroller besparelsen – og følg op, hvis den er mindre end forventet.

## **12. Referencer**

1. DS/EN 50160. Karakteristika for spændingen i offentlige elektricitetsforsyningsnet. 1. udgave 2011-01-27
2. DEFU Rekommandation 16. Spændingskvalitet i lavspændingsnet. 2. udgave. Juni 2001
3. Laboratoriemålinger af lyskilders spændingsafhængighed. Elforsk PSO-projekt nr. 3434-004. April 2012
4. Laboratoriemålinger af asynkronmotorers spændingsafhængighed. Elforsk PSO-projekt nr. 3434-004. Januar 2012
5. Vekselstrøms Motoren. ABB Motors. Brochure A 10-2004 D
6. Energy Savings Measurement Guide. Commonwealth of Australia. 2008
7. Energibesparelser i erhvervslivet. Dansk Energi Analyse A/S og Viegand & Maagøe ApS. Februar 2010

## Bilag 1. Leverandører af spændingssænkende udstyr

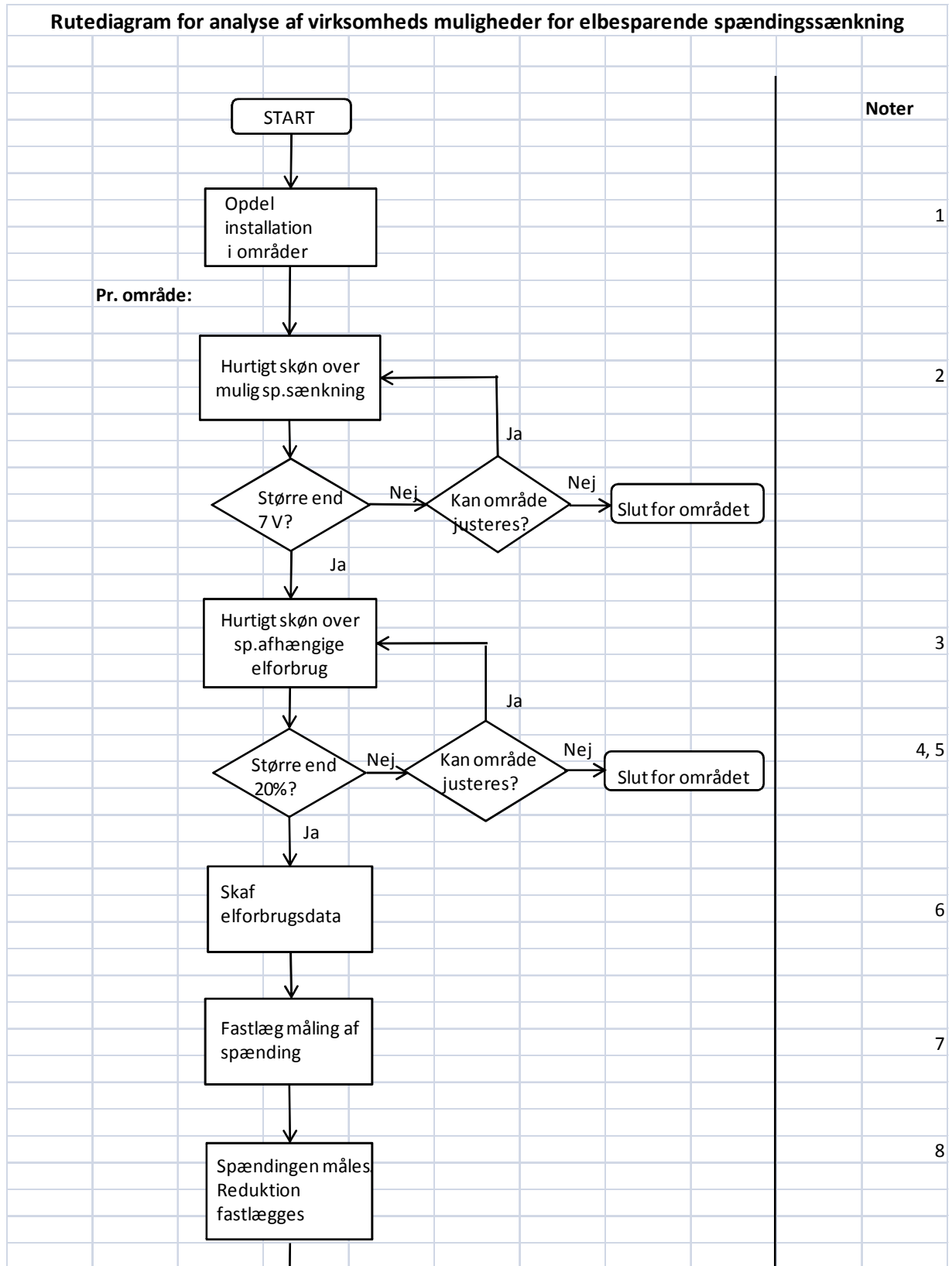
De første fire firmaer leverer spændingssænkende udstyr til generelle formål, mens de to sidstnævnte kun leverer til belysningsformål.

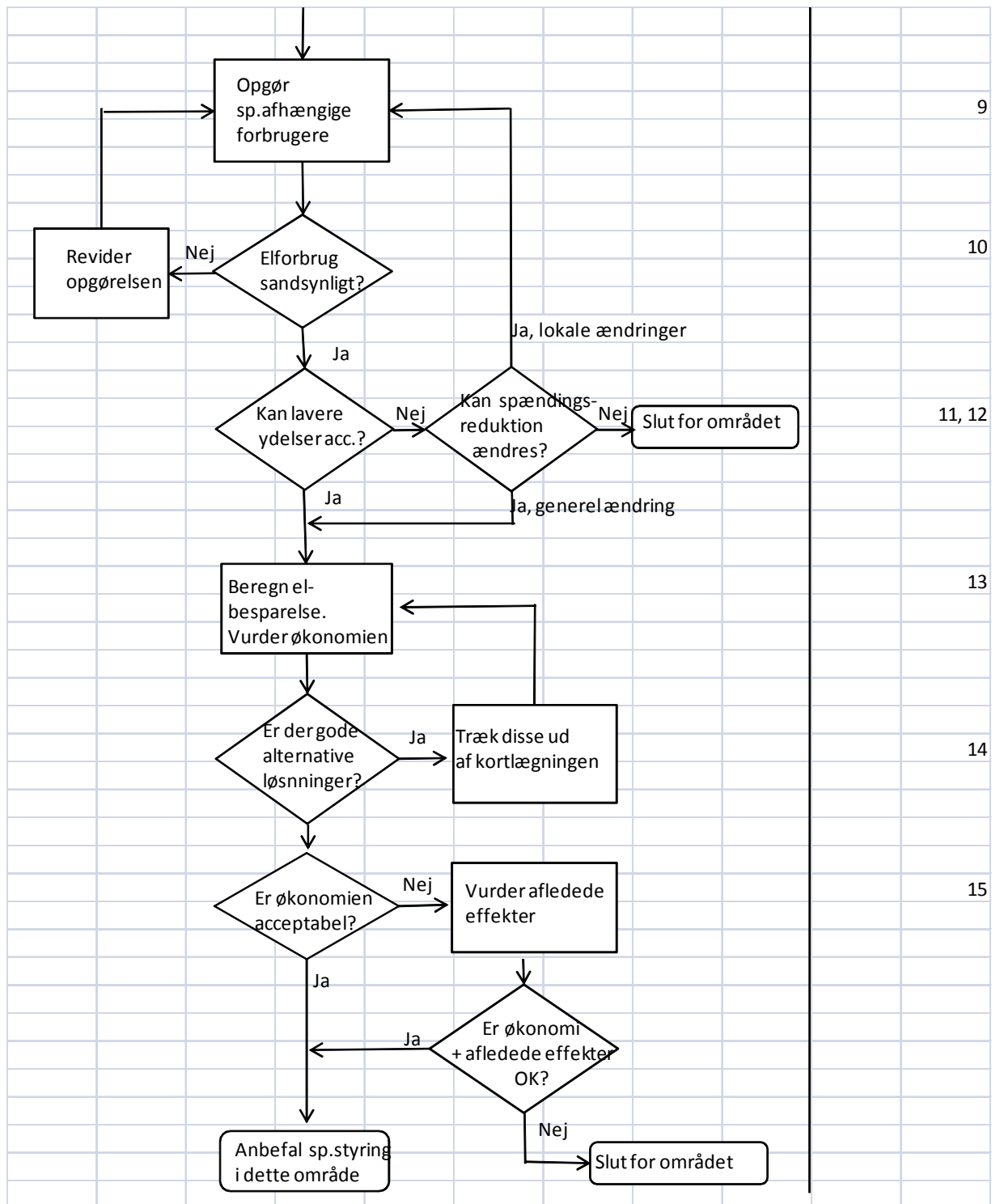
<i>Firma</i>	<i>Produktnavne</i>	<i>e-postadresse</i>
ABB	<ul style="list-style-type: none"><li>• PCS 100 AVC</li><li>• PVC</li></ul>	<a href="http://www.abb.com/product/seitp322/e039976253ee76f8c12576f600410658.aspx">www.abb.com/product/seitp322/e039976253ee76f8c12576f600410658.aspx</a>
Mariendal El-teknik A/S	<ul style="list-style-type: none"><li>• PowerSines Energy Controller</li></ul>	www.mariendal.dk
PSS Energi A/S	<ul style="list-style-type: none"><li>• Schuntermann Renecost</li><li>• Cleancost</li></ul>	www.pssenergy.com
TecPartnering	<ul style="list-style-type: none"><li>• powerPerfector</li></ul>	www.powerperfector.dk
Danish Wattguard ApS	<ul style="list-style-type: none"><li>• Wattguard</li></ul>	www.wattguard.dk
Llaison Link ApS	<ul style="list-style-type: none"><li>• EMU–EnergiSpare- &amp; Optimerings System</li></ul>	www.links3.eu

## Bilag 2. Lyskilders effektoptag

Lyskildetype	Lyskildeeffekt [W]	Effektoptag inkl. forkoblingsenhed [W]
Halogenlampe (12 V)	15	17
	20	23
	30	35
	35	40
	50	58
Lysstofrør (T8)	15	19
	18	23
	30	38
	36	45
	58	72
Kompaktlysstofrør	9	13
	11	15
	18	22
	24	28
	26	32
	36	44
	40	49
	55	68
Højtryksnatriumdamplampe	70	82
	150	176
	250	293
	400	468
	1000	1170
Kviksølvdamplampe	50	60
	80	95
	125	149
	250	298
	400	476
	1000	1190
Metalhalogenlampe	35	39
	50	55
	70	77
	100	110
	150	165

### Bilag 3. Rutediagram for analyse af besparelsesmulighederne





## Noter

1. Større installationer opdeles i flere områder, der analyseres hver for sig. Et område vil typisk være en transformers eller en tavles forsyningsområde.
2. Skønnet baseres på spotmålinger i et par af områdets "fjerneste punkter". Disse spændinger (målt som fase-spændinger) skal ligge mindst 7 V (3%) over den acceptable minimumsspænding. Ellers vil elbesparelsen formentlig blive mindre end 5% og tilbagebetalingstiden over 5 år.

3. Der laves indledningsvis et hurtigt skøn over elforbruget til lyskilder med konventionelle forkoblinger, til direkte forsynede motorer, som er belastet under 15%, samt til elvarmelegemer, der ikke reguleres.
4. Er elforbruget i det spændingsafhængige udstyr skønnet til under 20% af områdets samlede elforbrug, bliver den mulige elbesparelse efter al sandsynlighed under 5% af områdets elforbrug, og tilbagebetalingstiden bliver over 5 år.
5. Hvis andelen skønnes til under 20% vurderes, om området med mulig spændingssænkning kan begrænses til f. eks. kun at omfatte lystavler.
6. Data for elforbruger på timebasis kan formentlig skaffes fra netselskabet. De kan bruges til at fastlægge en passende periode for spændingsmålingen.
7. Måleperioden bør være mindst 1 uge og helst 2-3 uger.
8. Spændingen måles nær områdets indfødningspunkt og i et eller flere yderpunkter, hvor de laveste spændinger forventes at forekomme. Ud fra målingerne fastlægges den mulige spændingsreduktion, eventuelt (for udstyr med fastholdt udgangsspænding) opdelt på flere driftsperioder.
9. "Værktøj til analyse af spændingsstyring" benyttes til at opgøre de spændingsafhængige lyskilder, motorer og varmelegemer. Opgørelsen sker pr. driftsperiode. Motorernes belastninger bør måles, men er dette ikke praktisk muligt, kan den bestemmes ud fra omdrejningstallene (afsnit 3.2) eller tabel 2 med "typiske belastningsgrader" kan benyttes med forsigtighed.
10. Værktøjet beregner elforbruget i det spændingsafhængige udstyr ud fra de oplyste data. Dette elforbrug skal vurderes i forhold til det samlede elforbrug i det pågældende område.
11. Det vurderes, om det lavere lysniveau ved den pågældende spændingssænkning er acceptabel – også når lyskilderne er ældre og lysstrømmen derfor er mindre. Tilsvarende vurderes, om det er acceptabelt, at motorerne kører en smule langsommere, og at elvarmelegemerne er længere tid om opvarmningen.
12. Hvis spændingssænkningen ikke er acceptabel, kan en lidt mindre spændingssænkning måske accepteres. En anden løsning kan være at flytte det mest følsomme udstyr til et område med højere spænding eller at opsætte udstyr til lokal spændingsforhøjelse.
13. Værktøjet beregner elbesparelsen ud fra typiske data for udstyrets spændingsafhængighed (disse data kan om ønsket justeres), og økonomien i spændingssænkningen beregnes ud fra elprisen og de indtastede investeringsoplysninger.
14. Inden der træffes beslutning om spændingssænkning bør det vurderes, om besparelsen – eller dele af den – bedre opnås ved f. eks. at renovere eller forny belysningen eller ved at udskifte lavt belastede motorer med mindre motorer eller ved at styre motorer med frekvensomformere.
15. Afledede effekter kan være længere levetid for udstyret, mindre vedligehold o. lign. Pengebesparelsen og eventuelle driftsmæssige fordele og ulemper ved disse afledede effekter opgøres om muligt.



## **Bilag 4. 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 laboratorieundersøgelser 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

*Laboratiemålinger 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.

*Laboratiemålinger 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-lysstofrør, kviksløvdamplamper, 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 eleffekt 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 besparelsespotentialer 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 Søegaard, Moe & Brødskov
Elforsk	Jørn Borup Jensen, Dansk Energi