

AARHUS UNIVERSITET

4. SEMESTERPROJEKT GRUPPE1  
PROJEKT RAPPORT

## Spændingsregulator

201509249 - Caroline Møller Sørensen  
201611140 - Sophia Amalie Mortensen  
201505115 - Laurids Givskov Jørgensen  
201505195 - Dennis Slot Larsen  
201508333 - Søren Jensen  
13114 - Jeppe Hansen

Vejleder  
Emir Pasic

29. maj 2017

---

## Resume

Denne rapport beskriver et 4. semester projekt ved Ingeniørhøjskolen Aarhus Universitet på studieretningen Elektrisk Energiteknologi. Problemstillingen, der arbejdes med, er at udvikle et system, som kan sikre et stabilt spændingsniveau på en distributionslinje med varierende belastning.

Rapporten beskriver en prototype på en spændingsregulator, som kan installeres på en eksisterende distributionslinje. Prototypen indeholder en simulering af en distributionslinje, hvorpå spændingsregulatorens funktionalitet demonstreres. Reguleringen af spændingen foretages med en trintransformer, som skifter trin på baggrund af data fra måleenheder placeret centralt og decentralt på distributionslinjen.

Projektet indeholder programmering af måleenheder på PSoC, styring af trintransformeren på en Siemens PLC og TCP-kommunikation.

## Abstract

This paper describes a 4<sup>th</sup> semester project at Aarhus School of Engineering in the field of Electrical Engineering. The thesis is devoted to the development of a system that ensures a stable voltage level on a distribution line with varying load.

The paper describes a prototype of a voltage regulator, which can be installed on an existing distribution line. The prototype contains a simulation of a distribution line, on which the functionality of the voltage regulator is demonstrated. The voltage regulation is performed with a step transformer that changes step based on data from measurement devices placed centrally and decentrally on the distribution line.

The project includes programming of measurement devices on PSoC, controlling of the step transformer on a Siemens PLC and TCP-communication.

# Indhold

<b>Indhold</b>	<b>i</b>
<b>1 Forord</b>	<b>1</b>
<b>2 Indledning</b>	<b>2</b>
2.1 Termliste . . . . .	3
<b>3 Kravspecifikation</b>	<b>4</b>
3.1 Systembeskrivelse . . . . .	4
3.2 Funktionelle krav . . . . .	4
3.3 Ikke funktionelle krav . . . . .	6
3.4 Afgrænsning . . . . .	6
<b>4 Arkitektur</b>	<b>8</b>
4.1 Blok defintionsdiagram . . . . .	9
4.2 Interne blokdiagrammer . . . . .	10
4.3 Allokeringendiagram . . . . .	11
<b>5 Distributionslinje, belastning og Trinskifter</b>	<b>12</b>
5.1 Distributionslinje . . . . .	12
5.1.1 Design og implementering . . . . .	12
5.2 Belastning . . . . .	13
5.2.1 Design og implementering . . . . .	13
5.3 Trinskifter . . . . .	13
5.3.1 Design og implementering af relækredsløb . . . . .	13
5.3.2 Implementering af Trinsskifter . . . . .	14
5.4 Test . . . . .	14
5.5 Delkonklusion . . . . .	15
<b>6 Måleenhed</b>	<b>16</b>
6.1 Foranalyse . . . . .	16
6.2 Signalbehandling . . . . .	16
6.3 Harmoniske svingninger . . . . .	17
6.4 Design og implementering . . . . .	18
6.4.1 Hardware . . . . .	18
6.4.2 Software . . . . .	19
6.5 Kalibrering af Måleenhed . . . . .	21
6.6 Test . . . . .	22
6.7 Delkonklusion . . . . .	22
<b>7 Design af Styringsenhed</b>	<b>23</b>

---

7.1	Foranalyse . . . . .	23
7.1.1	Kontrolmodul og Brugergrænseflade . . . . .	23
7.1.2	Kommunikationsmodul . . . . .	23
7.2	Kontrolmodul . . . . .	24
7.2.1	Kommunikation . . . . .	24
7.2.2	Styring af Trinskifter . . . . .	25
7.3	Brugergrænseflade . . . . .	27
7.4	Kommunikationsmodul . . . . .	28
7.5	Test . . . . .	29
7.6	Delkonklusion . . . . .	30
<b>8</b>	<b>Resultat og diskussion</b>	<b>31</b>
<b>9</b>	<b>Metode og proces</b>	<b>32</b>
9.1	Udviklingsværktøjer . . . . .	33
<b>10</b>	<b>Fremtidigt arbejde</b>	<b>34</b>
<b>11</b>	<b>Perspektivering</b>	<b>35</b>
<b>12</b>	<b>Konklusion</b>	<b>36</b>
	<b>Bibliografi</b>	<b>37</b>

# Kapitel 1

## Forord

**Praktisk information:** I dette projekt deltog seks ingeniørstuderende fra Ingeniørhøjskolen Aarhus Universitet. De studerende er på 4. semester på studieretningen Elektrisk Energiteknologi. Projektgruppens vejleder er Emir Pasic, der løbende har vejledt gruppen. Semesterprojektets afleveringsdato er 29/5-2017 og bedømmelsesdato er 28/6-2017.

**Læsevejledning:** Henvisninger til projektdokumentationen er lavet med fodnoter, der angiver kapitelnummer og navn på det afsnit, der henvises til. Bilagshenvisninger er lavet med mappenavn og bilagsnummer.

**Tak til:** Der skal tilskrives en tak til Michael Rangård, Specialist Planlægning, og Poul Bagger Thomsen, Afdelingsleder Anlæg 20/0,4kV, fra Eniig for hjælp med data og besøg på transformerstation.

# Kapitel 2

## Indledning

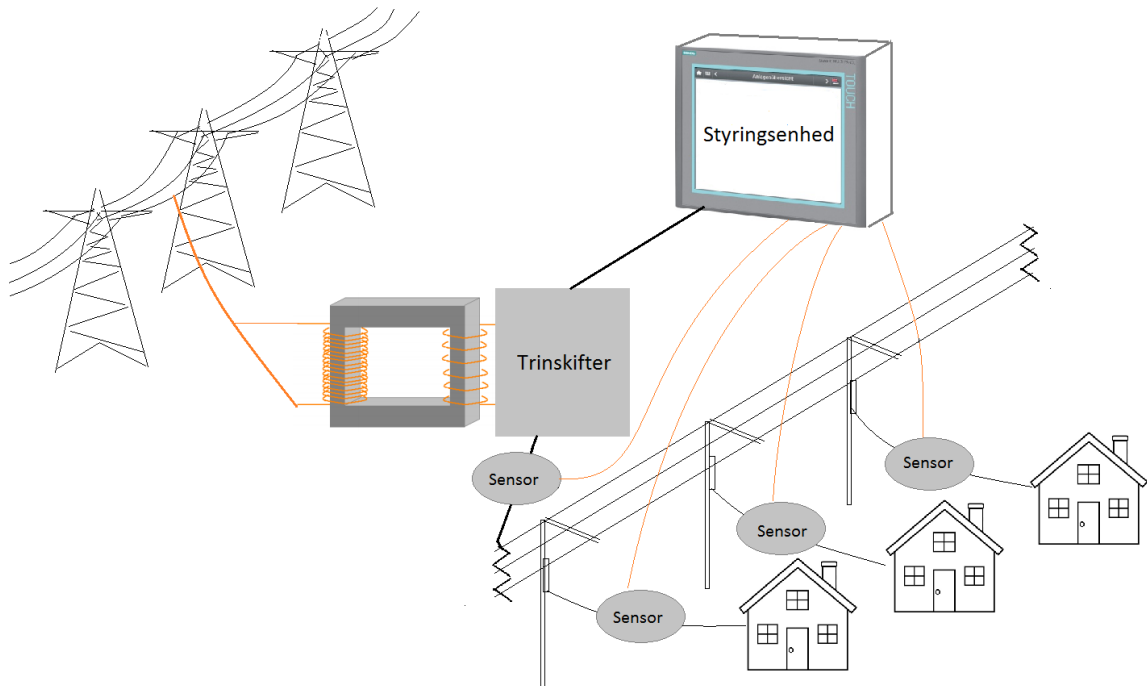
Formålet med dette projekt er at løse følgende problemformulering; *Når belastningerne i et distributionssystem ændres, vil spændingsniveauet variere. Det er vigtigt, at spændingsniveauet holdes stabilt. Hvordan sikres dette?* Udgangspunktet for problemstillingen er det lovmæssige krav, der siger, at spændingsforsyningen hos danske forbrugere altid skal ligge på  $230V \pm 10\%$  [6]. Det ønskes at undersøge udfordringerne ved dette samt at komme med et bud på, hvordan denne problemstilling løses bedst muligt, både som elnettet ser ud i dag, men også i fremtiden.

For at kunne arbejde med problemformuleringen og undersøge dens aktualitet, valgte projektgruppen at tage kontakt til energiselskabet Eniig. Det viste sig, at der på nuværende tidspunkt ikke foretages regulering på lavspændingsnettet, men i stedet på 60/10 kV transformere. Projektgruppen fandt det derfor interessant at undersøge mulighederne for regulering på lavspændingsnettet og eventuelle fordele og fremtidsaspekter ved dette.

I dette projekt vil fokus derfor være på den del af nettet, der går fra distributionstransformer og ud til forbrugere. For at sikre et stabilt spændingsniveau ønskes det at kunne overvåge tilstanden på distributionslinjen, ikke kun ved transformeren, men også ved hver enkelt forbruger. Det samlede system, der fremstilles i projektet betegnes som Spændingsregulator. Med denne ønskes det at lave et proof of concept i forhold til problemformuleringen. På grund af tilgængelighed af komponenter og udstyr vil prototypen for Spændingsregulator blive skaleret ned.

For at belyse problemstillingen vil der i dette projekt blive lavet en simulering af en distributionslinje samt belastninger, der skal simulere forbrugere på linjen. Projektet vil desuden bestå af en trintransformer, der giver mulighed for at variere spændingsniveauet til linjen og forbrugerne på sekundærsiden af transformeren.

Til justering af spændingsniveauet, er det nødvendigt at kende til de aktuelle værdier for spændingen både centralt ved trintransformeren og decentralt ved forbrugerne. Af denne grund implementeres enheder til måling af spændingen. Det ønskes desuden at kende til systemets power factor, og derfor skal strømmen også måles. Et eventuelt indhold af harmoniske kan føre til unødigt belastning og opvarmning af transformere, og det er derfor fornuftigt at kende til indholdet af harmoniske, og denne parameter skal også måles. For at kunne holde et ønsket spændingsniveau vil der i projektet implementeres en enhed til regulering af trin på transformeren.



Figur 2.1: Visuel fremstilling af Spændingsregulator

På figur 2.1 ses en illustration, der giver overblik over Spændingsregulatoren. Billedet viser trintransformeren, der forsyner distributionslinjen, sensorer, der måler aktuelle værdier på linjen og en styringsenhed, der regulerer trintransformeren på baggrund af disse værdier.

## 2.1 Termliste

Term	Beskrivelse
Spændingsregulator	Projektets prototype
Trintransformer	Transformer med variabelt omsætningsforhold
Trinskitter	Omfatter trintransformer og relækredsløb
Styringsenhed	PLC, HMI og Arduino
Måleenhed	PSoC og tilhørende hardware
Centralt	Ved trinskitter
Decentralt	Ved forbrugeren

Tabel 2.1: Termbeskrivelse

## Kapitel 3

# Kravspecifikation

Dette kapitel indeholder en overordnet beskrivelse af systemet samt en gennemgang af de funktionelle og ikke funktionelle krav, der stilles til systemet.

### 3.1 Systembeskrivelse

Spændingsregulatoren skal være i stand til at analysere forholdene på en distributionslinje. Derfor udvikles en måleenhed, som kan placeres decentralt, ved hver forbruger, og centralt ved spændingsregulatoren. Måleenhederne skal sende værdier for spænding, strøm, powerfactor og indhold af harmoniske til et system, som regulerer spændingen på baggrund af disse målinger.

Spændingsreguleringen laves med en trintransformer, hvor der med en styringsenhed kan skiftes mellem trinene. Styringsenheden kan automatisk regulere spændingen jf. data fra måleenhederne, eller den kan styres manuelt på en grafisk brugergrænseflade.

Systemet, der er udviklet i dette projekt, er proof of concept, så spændingsniveauet er skaleret ned. Der er designet et simuleringskredsløb i form af en distributionslinje og en række forbrugere for at vise funktionaliteten af Spændingsregulatoren. Forbrugerene kan kobles til/fra nettet for at generere et spændingsfald, der giver anledning til en regulering af trintransformeren.

### 3.2 Funktionelle krav

Funktionaliteten af systemet er beskrevet i tre use cases, som beskriver brugerens interaktion med systemet. Use casene vil her blive kort beskrevet, og et use case diagram er vist i Figur 3.1. Den automatiske spændingsregulering vil ligeledes blive beskrevet og vist i et tilstandsdiagram på Figur 3.2. Se dokumentation<sup>1</sup> for uddybning af funktionelle krav.

#### Use case 1 - Start manuel styring

Målet med denne use case er at ændre systemets tilstand fra automatisk til manuel mode. Dette gøres af brugeren, som vælger manuel styring på brugergrænsefladen.

#### Use case 2 - Stop manuel styring

Målet med denne use case er at ændre systemets tilstand fra manuel til automatisk mode. Dette gøres af brugeren, som vælger automatisk styring på brugergrænsefladen.

---

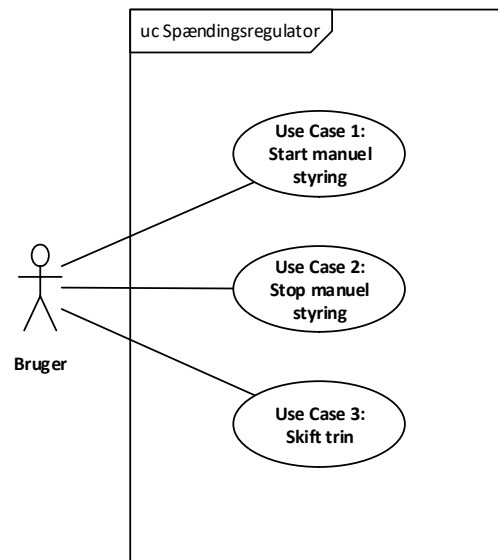
<sup>1</sup>Projektdokumentation, 3.3, Funktionelle krav



### Use case 3 - Skift trin

Målet med denne use case er at skifte trin på trintransformeren. Forudsætningen for use casen er, at systemet er i manuel mode. Brugeren kan via brugergrænsefladen skifte trin op eller ned afhængigt af hvilket trin, der er aktivt.

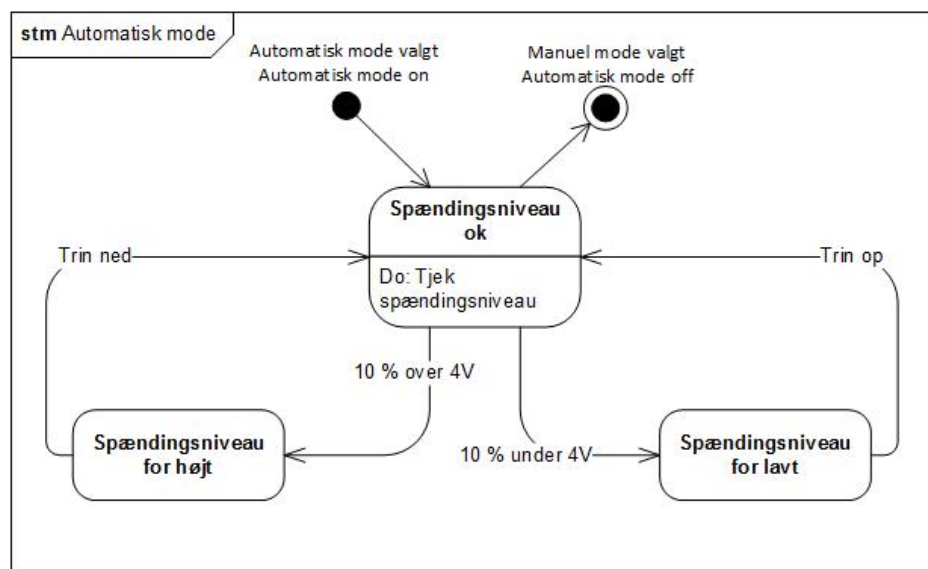
### Use case diagram



Figur 3.1: Usecase Diagram

### Beskrivelse af automatisk mode

Automatisk mode funktionen overvåger spændingen ved forbrugeren og skifter trin på trintransformeren, hvis spændingen falder/stiger med 10%.



Figur 3.2: Beskrivelse af automatisk mode

### 3.3 Ikke funktionelle krav

I dette afsnit beskrives de ikke funktionelle krav. Der findes ikke funktionelle krav til trintransformeren, målingerne og kommunikationen. Disse beskrives hver især i følgende afsnit.

#### Trintransformer

Den valgte trintransformer har nedenstående specifikationer. Det er besluttet ikke at lave større strømforbrug i systemet end 500mA.

1. Maks belastning af transformer er 20VA
2. Nominel spænding på primær siden er 24V
3. Nominel spænding på sekundær siden afhænger af trin, transformerne har 8 trin fra 1 til 8V.
4. Skal minimum kunne levere 500mA til systemet.

#### Måleenhed

Til en måleenhed burde der laves nøjagtighedsberegninger og defineres præcision. Dette er der bestemte standarder til, men da gruppen ikke har modtaget undervisning i emnet, og projektet er proof of concept, er det besluttet, at Måleenheden skal kunne måle indenfor en bestemt procent af den rigtige værdi og ikke gå længere ned i nøjagtighedsbegreberne.

1. Måle spændingen ved Trinskipsteren og forbrugerne mellem 0 og 8 Vrms
2. Måle spændingen med en præcision på  $\pm 5\%$
3. Måle strømmen ved Trinskipsteren og forbrugerne mellem 0 og 500mA
4. Måle strømmen med en præcision på  $\pm 5\%$
5. Måle og beregne power factor med en præcision på  $\pm 5\%$
6. Beregne THD med en præcision på  $\pm 5\%$

#### Kommunikation

For at sikre at der udvikles en pålidelig kommunikation, stilles der krav til, at der i de fleste tilfælde ikke må ske fejl, men da det er proof of concept, er det valgt ikke at have fejlhåndtering, hvis der skulle ske fejl i en forsendelse.

1. Forsinkelsen på brugergrænsefladen ift. ændringer i målte værdier må ikke overstige 2,5 sekunder.
2. 95% af alle sendte data skal være korrekte og uden forstyrrelser.

### 3.4 Afgrænsning

Afgrænsningen af projektet er lavet som en MoSCoW analyse. Der beskrives hvad, der skal med i projektet, for at det opfylder de fastsatte krav, og hvad der ikke er så vigtigt, men eventuelt kunne tilføjes i projektet senere. Der er i projektet ikke taget højde for optimering, men kun at der skal udvikles et færdigt funktionelt produkt, som kan løse problemformuleringen.

### MoSCoW

- Systemet **skal** bestå af en trinskifter 24/0-8V
- Systemet **skal** måle spænding, strøm, power factor og harmoniske centralt og decentralt
- Systemet **skal** vise data på en skærm
- Systemet **skal** simulere en distributionslinje og flere forbrugere
- Systemet **skal** kunne reguleres manuelt
- Systemet **burde** kunne reguleres automatisk
- Systemet **kunne** have en log
- Distributionslinjen **kunne** indeholde en decentral producent
- Systemet **vil ikke** fjerne harmoniske

## Kapitel 4

# Arkitektur

I arkitekturen bliver produktet, der kan løse problemformuleringen udformet. I kravsspecifikationen er det blevet gjort klart, hvilke krav der er til systemet. Ud fra kravene er et blok definitionsdiagram og to interne blokdiagrammer blevet lavet, som viser blokkene og deres interne forbindelser i den overordnede løsning.

Et allokeringsdiagram er med til at underbygge forståelsen for, hvordan disse blokke bliver realiseret softwaremæssigt, og hvilke enheder der vil være omdrejningspunkt for hver blok.

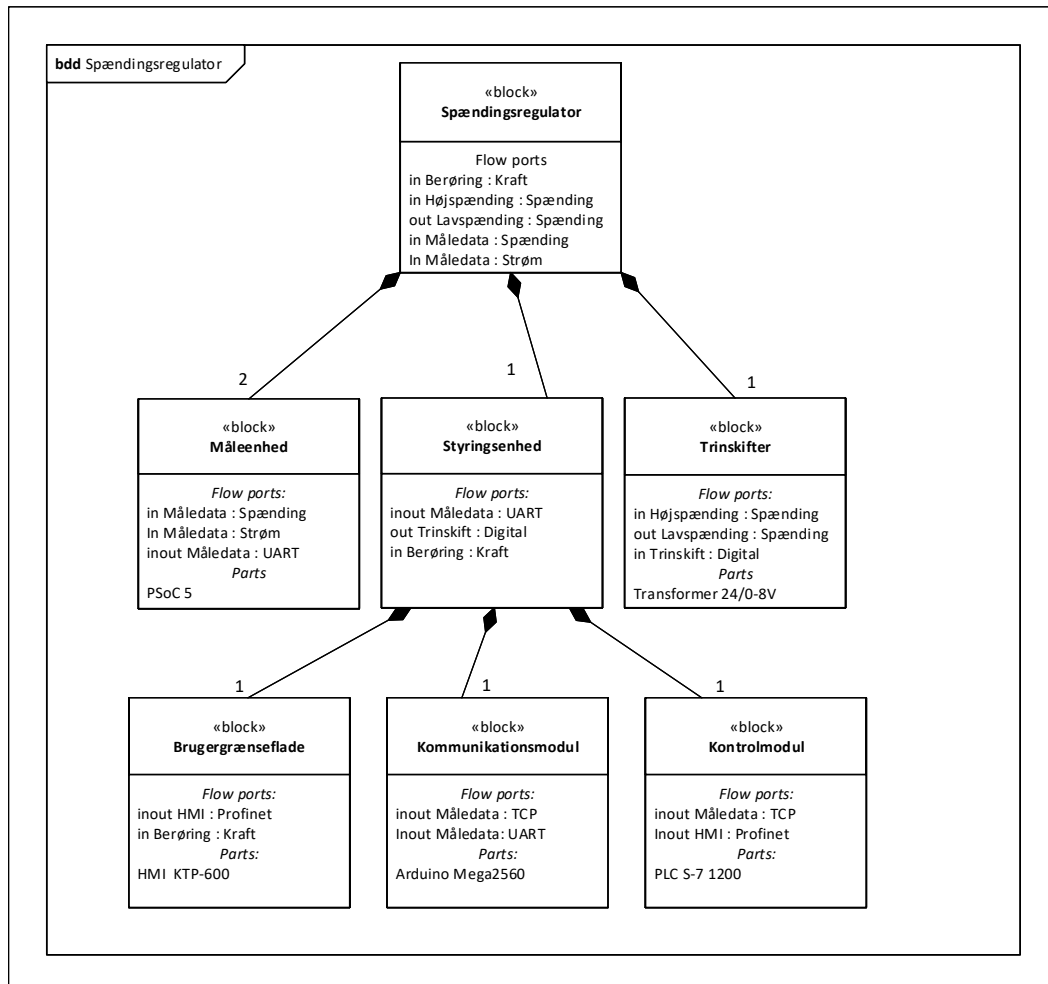
I rapporten er kun den endelige og vigtigste arkitektur medtaget. Der henvises til dokumentationen for den resterende del af arkitekturen i projektet.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>Projektdokumentation, 5, Arkitektur

## 4.1 Blok defintionsdiagram

I dette afsnit ses blok definitionsdiagrammet for Spændingsregulator. Se figur 4.1. BDD'et er lavet for at give et overordnet indblik i de blokke, systemet består af.



Figur 4.1: BDD Spændingsregulator

Der arbejdes med tre overordnede blokke; Måleenhed, Styringsenhed og Trinskifter. Med udgangspunkt i MoSCoW er opgaverne, hver blok skal løse, beskrevet herunder:

Måleenheden skal kunne måle spænding, strøm, power factor og harmoniske, både centralt og decentralt. Data herfra skal kommunikerer videre til Styringsenheden.

Styringsenheden skal kunne vise data på en skærm og burde kunne regulere Trinskifter automatisk. Der skal være muligheder for at regulere Trinskifter manuelt fra Styringsenheden. Den skal have et interface til kommunikation med Måleenheden. Det er derfor besluttet, at Styringsenhed har tre underblokke; Brugergænseflade, Kontrolmodul og Kommunikationsmodul.

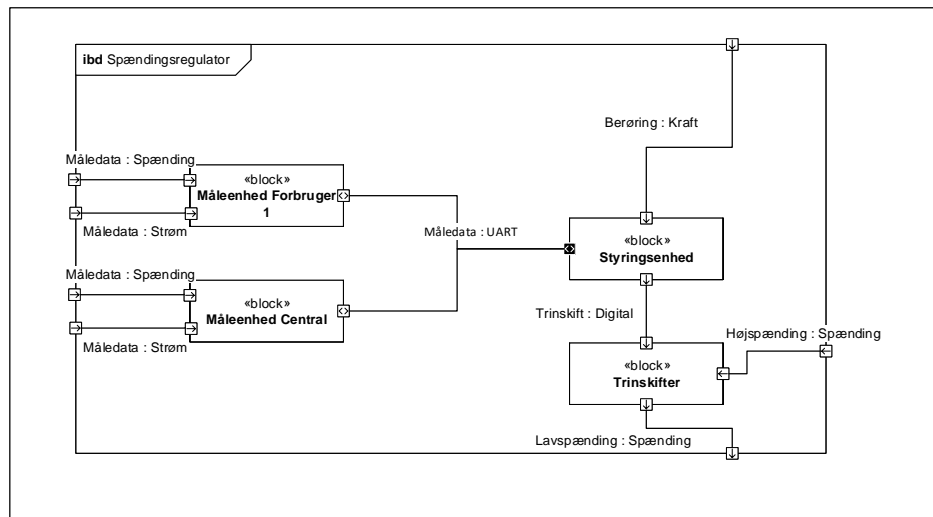
Trinskifter skal bestå af en trintransformer 24/0-8V og skal tilkobles en simuleret Distributionslinje og flere forbrugere. Derudover skal den indeholde en form for styring til trintransformeren.

For yderligere forklaring af blokkene se dokumentationen<sup>2</sup>.

<sup>2</sup>Projektdokumentation, 5.1, Blok definitionsdiagram

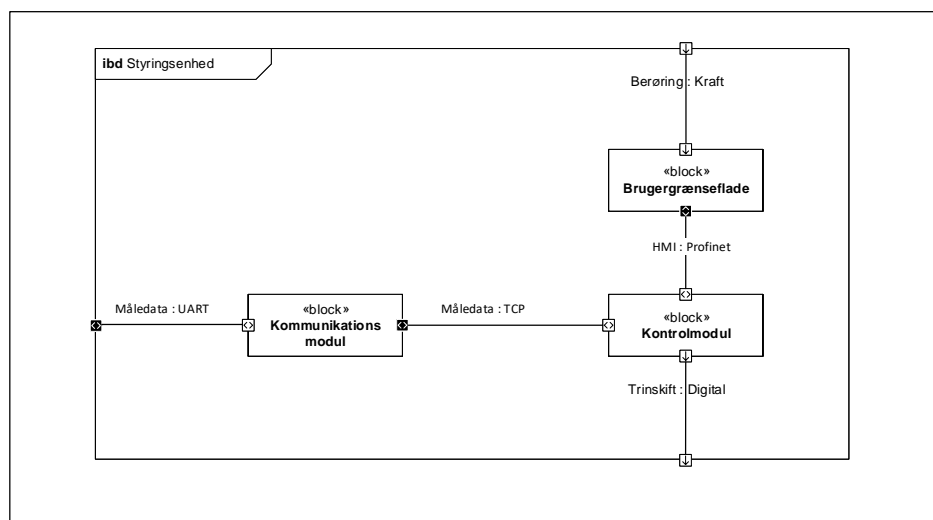
## 4.2 Interne blokdigrammer

Herunder ses interne blokdigrammer for Spændingsregulatoren. De interne blokdigrammer er dannet for at give et indtryk af, hvordan enhederne kommunikerer og sender signaler indbyrdes. Først ses det interne blokdigram for hele systemet, hvor de overordnede forbindelser i Spændingsregulatoren kan ses. Se figur 4.2. For et yderligere overblik over de indbyrdes signaler, se dokumentation<sup>3</sup>. Derefter ses et internt blokdigram for selve Styringsenhed, der yderligere består af tre mindre dele.



Figur 4.2: IBD for Spændingsregulator

Det interne blokdigram for Styringsenheden er udviklet for at beskrive, hvordan modulerne i Styringsenheden kommunikerer indbyrdes. Det ses samtidig, hvilke inputs og outputs der er til og fra den samlede Styringsenhed. Se figur 4.2. For yderlig uddybelse af de indbyrdes signaler se dokumentation<sup>4</sup>.



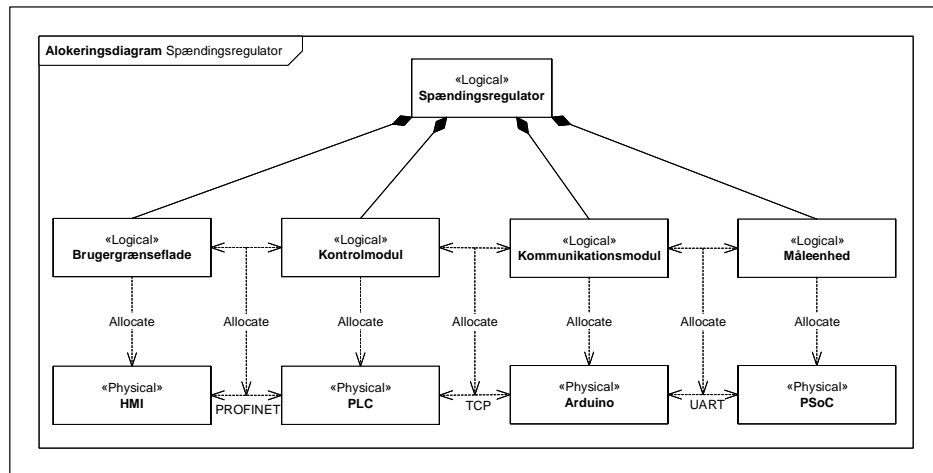
Figur 4.3: IBD for Styringsenhed

<sup>3</sup>Projektdokumentation, 5.2, Intern blok diagram

<sup>4</sup>Projektdokumentation, 5.2, Intern blok diagram

### 4.3 Allokeringsdiagram

Herunder ses allokeringsdiagrammet udviklet i projektet. Diagrammet er udviklet for at give et overblik over implementeringen af software og kommunikation i projektet. Et allokeringsdiagram giver et indblik i hvilke fysiske dele, der vil blive brugt til at realisere softwaren på blokkene benyttet i de forrige diagrammer. For yderligere beskrivelse af diagrammet se dokumentation<sup>5</sup>.



Figur 4.4: Allokeringsdiagram for Spændingsregulator

<sup>5</sup>Projektdokumentation, 5.3, Allokeringsdiagram

## Kapitel 5

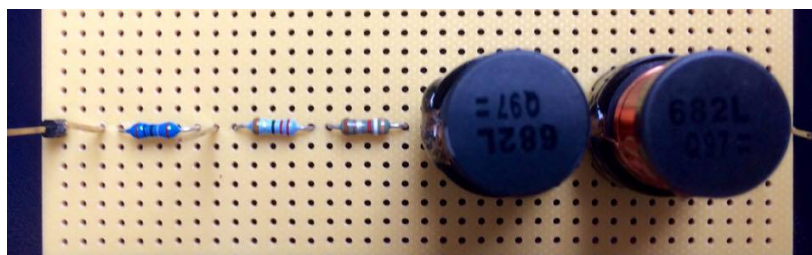
# Distributionslinje, belastning og Trinskitter

### 5.1 Distributionslinje

Til simulering af en distributionslinje skulle kabellængde og kabelparametre bestemmes. For kabelparametre blev der i samarbejde med vejleder valgt en kabeltype fra NKT Cables, se bilag B1. For kabellængden kontaktede projektgruppen energiselskabet Eniig og modtog et kortudsnit fra deres netbase, se bilag C2. Længden af distributionslinjer i kortudsnittet er ikke længere end 1 km, og med de valgte kabelparametre,  $0,10 \Omega/\text{km}$  og  $0,22 \text{ mH}/\text{km}$ , vil dette ikke påvirke spændingen tilstrækkeligt. For at få en påvirkning fra kablet vælges det derfor at simulere en distributionslinje med længde  $60 \text{ km}^1$ .

#### 5.1.1 Design og implementering

På baggrund af de valgte kabelparametre og tilgængelige komponenter er simuleringen af Distributionslinjen implementeret med værdierne  $6,2 \Omega$  og  $13,6 \text{ mH}$  gennem to modstande og to spoler i serie. Til den centrale Måleenhed implementeres også en  $1 \Omega$  modstand. Den implementerede Distributionslinje ses på figur 5.1.



Figur 5.1: Færdigt print med Distributionslinje

På baggrund af Distributionslinjens parametre forventes en påvirkning af bl.a. systemets power factor. Denne er derfor blevet beregnet og simuleret for senere at kunne sammenligne disse værdier med de målte værdier <sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup>Projektdokumentation, 8.1, Distributionslinje

<sup>2</sup>Projektdokumentation, 8.3, power factor samt Projektdokumentation, 8.5.2, modultest

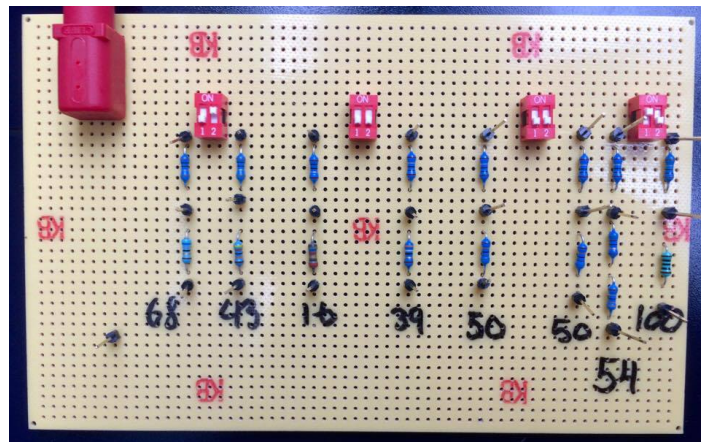


## 5.2 Belastning

Til simulering af forbrugere i systemet er ohmske belastninger benyttet. Modstandsværdierne for disse er valgt i intervallet  $16\Omega$  til  $100\Omega$ , da det er beregnet og simuleret, at disse vil give tilstrækkeligt spændingsfald til at medføre trinskift<sup>3</sup>.

### 5.2.1 Design og implementering

I systemet er de førnævnte belastninger placeret i parallelforbindelse, og til hver belastning hører en kontakt, der giver mulighed for nemt at til- og frakoble forskellige belastninger. I serie med hver belastning sidder en  $1\Omega$  modstand for at kunne tilkoble en Måleenhed til overvågning. Det færdige print med belastninger ses på figur 5.2. Nederst til venstre på printet ses den pin, der kobles til Distributionslinjen. Øverst til venstre ses bananstik, der kobles til 0V på trintransformeren.



Figur 5.2: Færdigt print med belastninger

## 5.3 Trinskitter

Ved projektets start fik gruppen udleveret en trintransformer<sup>4</sup>. Denne transformer har på primærside 24V og trin af 1V fra 0-8V på sekundærside. Disse forhold afgjorde skaleringen af systemet, se bilag C3 og C4 for billeder af transformer og tilhørende mærkeplade.

De forskellige trin og dermed spændingsniveauer på sekundærside af transformeren er bestemt af antallet af tilkoblede viklinger. Det ønskede spændingsniveau hos forbrugeren er valgt til 4V, og det er i systemet muligt at skifte mellem trin 4V, 5V og 6V på trintransformeren. Disse tre trin gør det muligt at holde spændingen hos forbrugeren på  $\pm 10\%$  af 4V, når belastningen varierer.

### 5.3.1 Design og implementering af relækredsløb

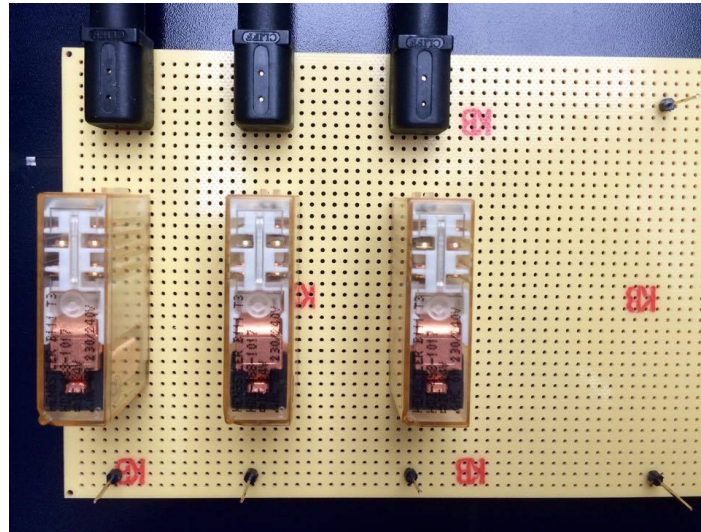
Til at styre tilkoblingen af trin på transformeren er der designet et relækredsløb. Relæerne er Normally Open kontakter, der slutter, når relæerne trækker, se bilag B5. Kontaktrelæerne skal styres af en PLC, og skal derfor kunne operere ved 24VDC styresignal<sup>5</sup>. Det færdige print med relæerne ses på figur 5.3. De sorte bananstik kobles til henholdsvis trin 4V, 5V og

<sup>3</sup>Projektdokumentation, 8.2.1, Beregning af Belastning

<sup>4</sup>Projektdokumentation, 6.1, Valg af transformer

<sup>5</sup>Projektdokumentation, 8.4, Trinskitter

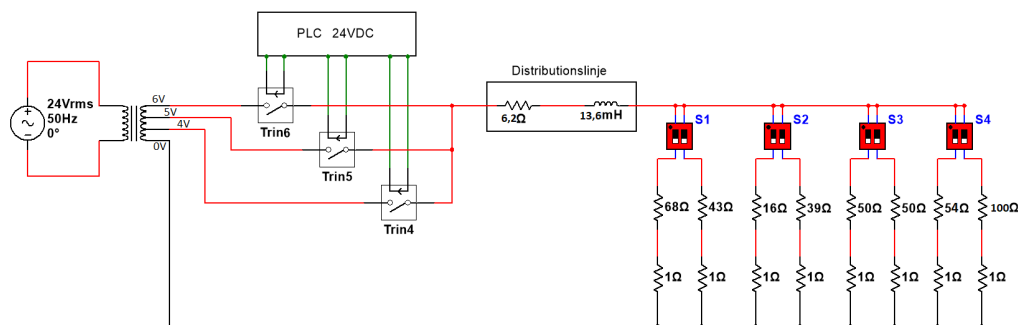
6V på transformeren. Øverst til højre ses den pin, der kobles til Distributionslinjen. De tre pins nederst til venstre er til styresignal fra PLC og den fjerde er stelforbindelse for PLC.



Figur 5.3: Færdigt print med relæer

### 5.3.2 Implementering af Trinsskifter

Trinsskifter består af trintransformer og relækredsløb. På figur 5.4 ses, hvordan disse kobles til PLC, Distributionslinje og belastninger.



Figur 5.4: Kredsløbstegning af Distributionslinje, belastninger og Trinsskifter

Det ses, hvorledes hvert trin på transformeren er tilkoblet hvert kontaktrelæ. Gennem PLC styresignalet tilkobles ønsket trin. Eksempelvis for at skifte fra trin 4V til trin 5V, kobles trin 4V og trin 5V. Efter to sekunder slås trin 4V fra, og dermed bliver trin 5V det gældende trin. På denne måde sikres det, at forsyningen til systemet ikke forsvinder ved trinskift. Det er muligt at koble to trin på samme tid, da strømmen altid vil vælge den korteste vej i viklingerne på transformers sekundærside.

## 5.4 Test

Ved gennemførelse af modultest for det samlede system for Distributionslinje, Belastning og Trinsskifter blev det konkluderet, at det implementerede system opnår forventet spænding- og strømniveauer ved variabel belastning. Dog ses en lille afvigelse mellem de simulerede

og målte værdier, men resultaterne kan anvendes til proof of concept<sup>6</sup>. Da Distributionslinjens spolevirkning påvirker værdien for power factor i systemet, blev værdien af denne ligeledes målt af Måleenheden. Denne påvirkning af power factor kan ses i måleresultaterne, men spolevirkningen er ikke stor nok til, at power factoren ændres ved forskellige belastningsværdier<sup>7</sup>.

## 5.5 Delkonklusion

I kapitel 5 er overvejelser omkring udvikling, design og implementering af Distributionslinje, Belastning og Trinskitter blevet beskrevet. Der er implementeret en simulering af en 60 km lang distributionslinje med modstand- og spolevirkning, der påvirker spændingsfald og power factor i systemet. Ligeledes er der implementeret belastninger, der kan til- og frakobles for at variere spændingsfaldet over disse. Endeligt er der implementeret en trinskitter i form af en trintransformer og et relækredsløb til skift af trin. På baggrund af modultest kan det konkluderes, at disse enheder giver mulighed for at lave det ønskede proof of concept.

---

<sup>6</sup>Projektdokumentation, 8.5.1, Spænding over belastning

<sup>7</sup>Projektdokumentation, 8.5.2, Power factor

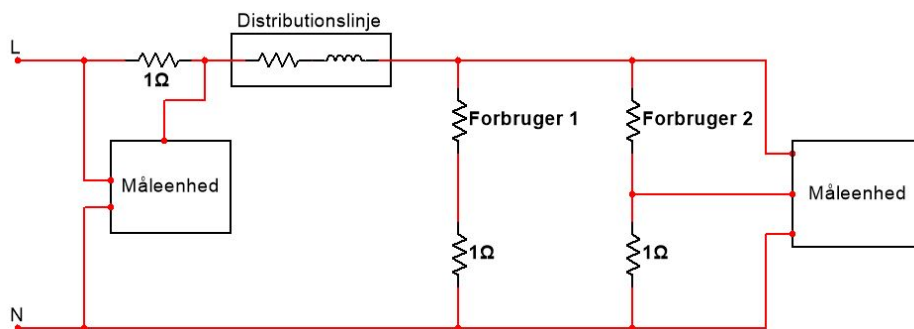
# Kapitel 6

## Måleenhed

For at Spændingsregulatoren kan foretage en regulering af spændingen i systemet, skal den løbende have informationer om de reelle forhold i nettet. Denne information står Måleenheden for at indsamle. Måleenhedens opgave er at måle spænding, strøm, indhold af harmoniske og power factor. I kapitlet vil der blive redegjort for hvilke løsninger, der er valgt for at opnå den ønskede funktionalitet.

### 6.1 Foranalyse

Det var først tænkt at købe nogle sensorer til PLC'en, der kunne måle de ønskede værdier. Men da PLC'en ikke kan sample hurtigt nok til at give et reelt billede af signalet, er der valgt at bruge en PSoC til at sample signalet. Derefter kan værdierne sendes til Styringsenheden. Måleenheden er tænkt til at skulle måle differentielt som vist på figur 6.1. Spændingen måles over forbrugeren og  $1\Omega$  modstand, hvor strømmen måles som spændingen over den  $1\Omega$  modstand.



Figur 6.1: Tænkt tilslutning af måleenhed

### 6.2 Signalbehandling

Iht. Shannons samplingsteori[5] kan der ses et reelt billede af et signal, når samplingsfrekvensen er dobbelt så stor som selve signalet. Da systemet er proof of concept, er det besluttet kun at aflæse på de fire første harmoniske til 50Hz signalet. Det vil sige, at der undersøges, hvor meget energi der er i frekvenserne 100, 150, 200 og 250Hz. Det betyder, at der minimum skal samples med 500Hz i projektet.

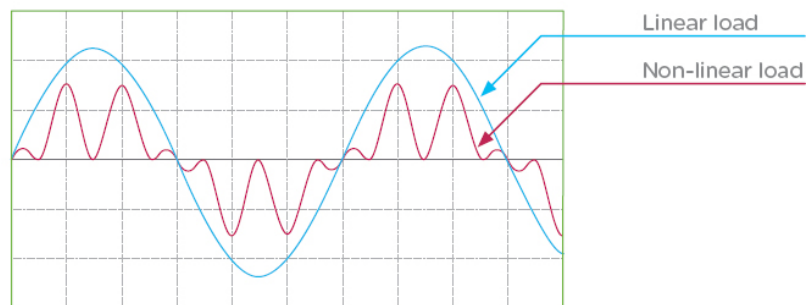
Når et signal er samplet til det digitale spektrum, kan signalet analyseres. Til at undersøge signalernes størrelse, power factor og indhold af harmoniske kan Fourier anvendes. Ved at lave Fourier på en række samplede værdier, fås en ny række komplekse tal. Hvert kompleks tal

angiver værdien for en bestemt frekvens i et signal, der kaldes for frekvens bins. Ud fra denne komplekse værdi kan størrelsen og fasevinklen ved bestemte frekvenser findes. Det anvendes i projektet til at beregne rms-værdier af spænding og strøm for 50Hz, men også vinklen mellem spænding og strøm, der giver udtryk for power factoren. Derudover kan signalet også undersøges i højere frekvenser, så indholdet af harmoniske kan udregnes.

### 6.3 Harmoniske svingninger

Harmoniske svingninger i et elektrisk energisystem er spændinger og strømme med højere frekvenser, som dannes af ulineære belastninger, der trækker strøm i korte pulser. Sådanne belastninger kan være strømforsyninger til elektroniske apparater og frekvensomformere. Hvis indholdet af harmoniske svingninger i energisystemet bliver for stort, kan det resultere i varmeudvikling i elektrisk udstyr på nettet og i værste tilfælde få udstyr til at fejle.

En ulineær belastning er kendetegnet ved, at strømmen den trækker ikke følger den sinusformede spænding. Som det ses af figur 6.2, indeholder den røde kurve, som er ulineær, højere frekvenser end grundfrekvensen, som er repræsenteret med den blå kurve.



Figur 6.2: Lineær belastning sammenlignet med en ulineær belastning.

I den virkelige verden er der tilsluttet en lang række ulineære belastninger til elnettet, i form af elektriske strømforsyninger, lysdæmpere, elektronik, frekvensomformer mm. Alle disse trækker strøm i pulser, som forårsager, at elnettes sinussignal bliver forvrænget. Det forvrængede sinussignal giver anledning til større tab i transmissionslinjer, beskadigede komponenter og tab af energi i form af varmeudvikling i transformere og generatorer.

Forvrængningen af sinussignalet kan analyseres ved hjælp af en matematisk funktion kaldet Total Harmonic Distortion (THD). Ved at anvende Fourier-analyse på det forvrængede signal, kan man udlede indholdet af harmoniske. THD er et udtryk for, hvor stor en procentdel de harmoniske svingninger svarer til i forhold til den fundamentale frekvens. Udregningen af THD er givet i formel 6.1, hvor  $V_1$  er amplituden af den fundamentale frekvens.  $V_n$  er amplituden af de fortløbende harmoniske.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (6.1)$$

THD udregnes for spændingen, da det er denne, som er fælles for alle komponenter på elnettet. Teoretisk set indeholder vekselstrømsnettet kun de ulige harmoniske, altså 1, 3, 5 osv. I balancerede systemer kan der også ses bort fra harmoniske, der kan deles med tre, altså 3, 9, 15 osv. Men da elnettet i virkeligheden sjældent er balanceret, er det vigtigt at være opmærksom på, at disse harmoniske kan opstå.

Hvis problemet med harmoniske når til et kritisk niveau, kan systemet analyseres for at finde kilden til forvrængningen og herefter fjerne denne. Der findes også filterkomponenter, som kan minimere transmissionen af harmoniske på elnettet. Disse filtre findes som analoge, der består af spoler og kondensatorer, der dæmper de høje frekvenser. Der findes ligeledes digitale filtre, som analyserer forvrængningen og genererer inverse signaler for at ophæve de harmoniske.[2]

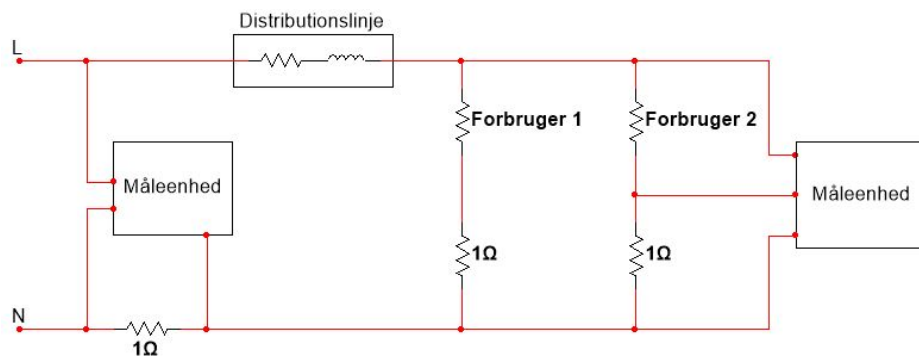
Kildehenvisning: [4]

## 6.4 Design og implementering

I dette afsnit beskrives, hvordan Måleenheden er udviklet. Måleenheden er designet til at måle strøm og spænding centralt og decentralt. Spændingen måles parallelt over forbrugeren. Strømmen måles som spændingsfaldet hen over en  $1\Omega$  modstand i serie med hver forbruger og transmissionslinje.

### 6.4.1 Hardware

Under udviklingen af hardwaren har det vist sig, at der ikke kunne måles differentielt mellem to tilfældige punkter, men at der kun kan måles mellem et punkt og nul. Dette gav ikke noget problem ift. målingen ved forbrugerne, men det betød, at der ikke kunne måles centralt ved den viste opstilling på figur 6.1. Dette blev løst ved at flytte  $1\Omega$  modstanden ned til N, som vist på figur 6.3. Der må derfor accepteres et spændingsfald over denne modstand.

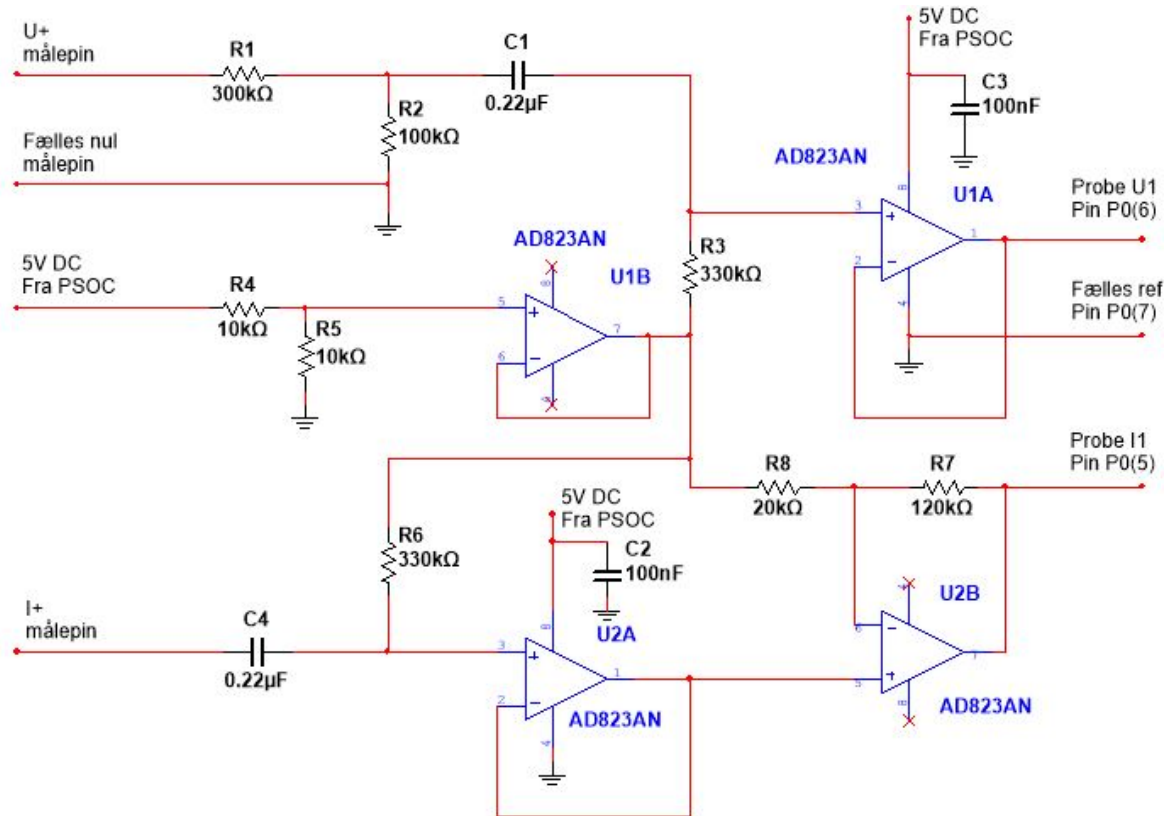


Figur 6.3: Aktuel tilslutning af Måleenhed

### Hardware beskrivelse

PSoC'ens sample område ligger mellem 0 og 5V, hvor signalerne til spændingen og strømmen forventes at svinge omkring 0V. Derfor er der udviklet hardware, der kan hæve signalerne til at svinge omkring 2,5V. Måleenheden skal kunne måle op til 8V, så derfor har det været nødvendigt at dæmpe spændingssignalet. Strømniveauet er tilgængeligt meget lille, hvorfor dette skal forstærkes. På figur 6.4 ses kredsløbsdiagrammet for hardwaren. Det er valgt at bruge operationsforstærkeren AD823, der er en rail-to-rail-forstærker, som kan forsynes med 5VDC fra PSoC'en. Yderligere information om hardwaren kan findes i dokumentationen<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Projektdokumentation, 9.1, Hardware



Figur 6.4: Diagram for hardwaren til Måleenheden

### 6.4.2 Software

I dette afsnit vil design og implementering af softwaren på PSoC blive beskrevet. Herunder ADC konvertering, Fourier beregninger og UART kommunikation. For detaljeret beskrivelse af softwaren henvises til dokumentationen<sup>2</sup>.

#### Overordnet beskrivelse

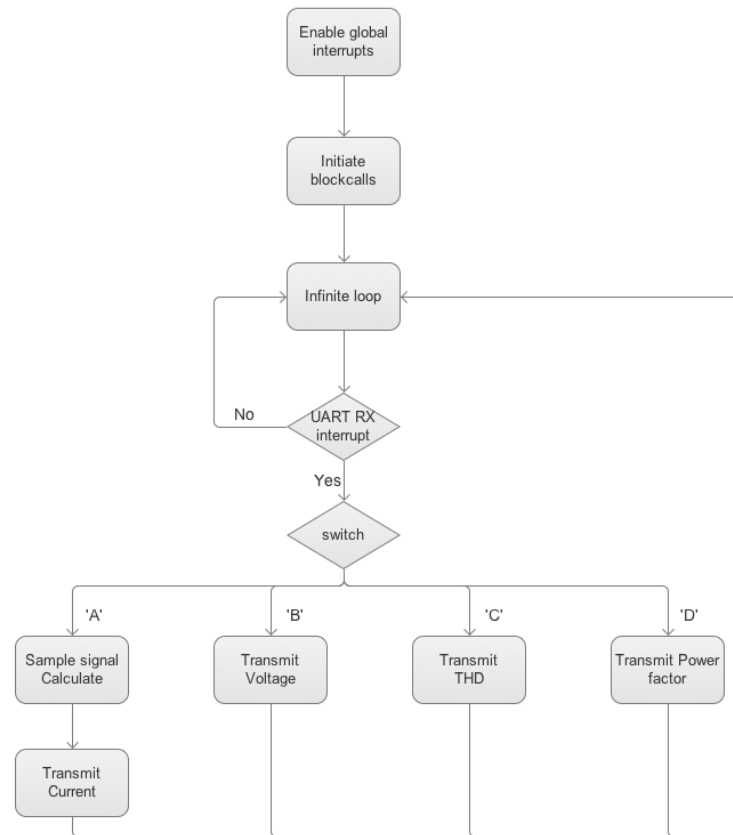
Det overordnede flow i koden er vist i figur 6.5 og vil blive beskrevet i den følgende tekst.

Ved start af Måleenheden sker der en række initieringer af interrupts og blokkald. Herefter ender koden i et uendeligt loop uden aktivitet. Ved modtagelse af data over UART forbindelsen aktiveres en interruptrutine, hvor hovedparten af kodens funktionalitet er allokeret. Afhængigt af hvilken karakter, der er modtaget på UART forbindelsen udføres forskellige instruktioner. Ifølge protokollen for UART-forbindelsen modtages karakterene A-B-C-D i rækkefølge, se dokumentationen<sup>3</sup>. Når den første karakter A er modtaget, påbegynder Måleenheden sampling af signalerne, hvorefter værdien for strøm sendes tilbage over UART forbindelsen. Herefter afventes de resterende modtage-interrupts, som giver anledning til, at spænding, THD og power factor sendes til Styringsenheden.

<sup>2</sup>Projektdokumentation, 9.2, Software

<sup>3</sup>Projektdokumentation, 7.2, UART protokol





Figur 6.5: Overordnet flowchart for software på Måleenhed

### Analog til digital konvertering

Måleenheden omsætter to analoge spændingssignaler til digitale værdier, som kan behandles af softwaren på PSoC. Denne konvertering foretages af en Delta Sigma Analog to Digital Converter (ADC), som er indstillet med en opløsning på 16bit og en samplefrekvens på 41,67kHz. Denne samplefrekvens er meget højere end minimumskravet på 500Hz jf. Shannons samplingssætning. Med den samplefrekvens vil datamængden, der skal behandles i Fourier transformation blive alt for stor. Derfor er samplefrekvensen nedsat ved at indsætte et delay i koden efter hvert andet sample. Se dokumentationen<sup>4</sup> for udregning af delayets størrelse. Med delayet er samplefrekvensen nedsat til 3,2kHz for hvert signal, hvilket svarer til 64 samples pr. periode af 50Hz signalet. Da der samples to signaler skiftevis vil ADC'ens reelle samplefrekvens være 6,4kHz, og der vil være en forsinkelse mellem samplingen af de to signaler. Ved beregning af power factor er der set bort fra denne forsinkelse, da den ikke har afgørende betydning for resultatet.

### Fourier

Til beregning af Fourier på de samplede signaler er der fundet en funktion på et Cypress forum[3]. Dette er en FFT funktion, der har den fordel at være meget hurtigere end den normale DFT. Til gengæld skal antallet af samples gå op i  $2^x$ . Det er valgt at anvende denne

<sup>4</sup>Projektdokumentation, 9.2.2, Analog til digital konvertering



funktion, da den er udviklet til PSoC creator og kan derfor nemt anvendes i projektet, og det har ikke været et problem at tilpasse antal samples til at gå op i  $2^x$ . Yderligere information om implementering af Fourier kan findes i dokumentationen<sup>5</sup>.

### Beregningsfunktioner

For at beregne de ønskede værdier er der lavet en række funktioner. Disse funktioner er kort beskrevet herunder. Yderligere information findes i dokumentation<sup>6</sup>

**Rms:** Funktionen modtager et array af absolutte værdier for et signal og beregner rms-værdien ved den frekvensbin, der passer til 50Hz.

**Power factor:** Funktionen beregner vinklen for strøm og spænding for derefter at beregne power factor ved at tage cosinus til vinkel differencen. Funktionen tager ikke højde for, om strømmen er leading eller lagging.

**THD:** Beregningen af og baggrunden for THD er beskrevet i afsnit 6.3. Den beregning, der laves i PSoC, medregner kun indholdet af de fire første harmoniske i signalet. Formlen, der anvendes i softwaren, er givet i ligning 6.2.

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + V_5^2}}{V_1} \quad (6.2)$$

### UART kommunikation

Kommunikationen mellem Måleenheden og Styringsenheden er allokeret på en UART forbindelse, se figur 4.4 for overordnet allokeringsskema. UART forbindelsen transmitterer 16bit værdier for strøm, spænding, THD og power factor. Værdierne deles inden transmissionen op i to pakker af 8bit og samles igen i Styringsenheden. Protokol og indstilling af UART forbindelsen er beskrevet i dokumentationen<sup>7</sup>.

## 6.5 Kalibrering af Måleenhed

Den forstærkning og dæmpning, der er implementeret i Måleenhedens hardware, giver anledning til en lineær fejl på målingerne. Da forstærkningen og dæmpningen begge er lineære, kan der laves en simpel kalibrering af måleenheden, som er beskrevet i dokumentationen<sup>8</sup>.

Ved at påtrykke Måleenheden en kendt spænding og aflæse den målte værdi på Måleenheden kan sammenhængen mellem reel spænding og målt spænding plottes som en lineær sammenhæng. Hældningen af den lineære tendenslinje vil give kalibreringskonstanten, som skal ganges på målingen i softwaren.

Resultatet af kalibreringen er vist i figur 6.6

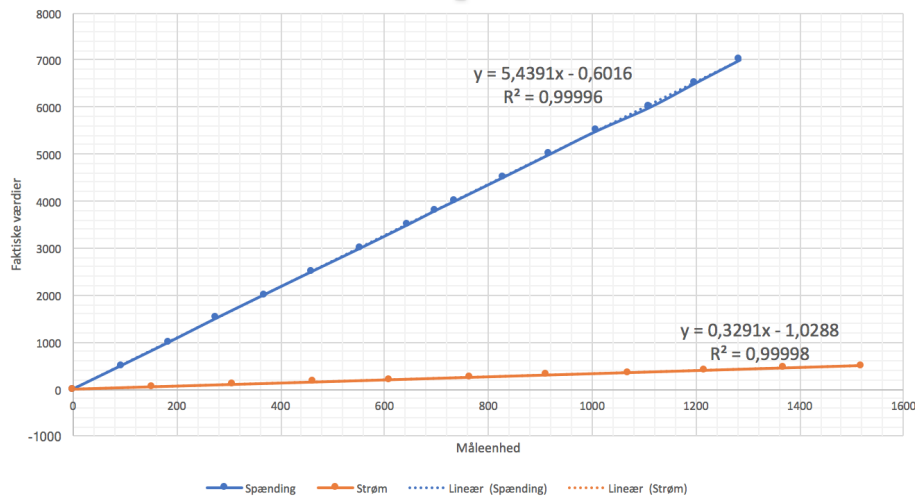
---

<sup>5</sup>Projektdokumentation, 9.2.3, Fourier Algoritme

<sup>6</sup>Projektdokumentation, 9.2.4, Beregning af rms og power factor

<sup>7</sup>Projektdokumentation, 7.2, UART protokol

<sup>8</sup>Projektdokumentation, 9.2.7, Kalibrering af Måleenhed



Figur 6.6: Sammenhæng mellem faktiske spændinger og værdier i Måleenheden.

## 6.6 Test

Der er løbende udført test af Måleenheden. Efter implementeringen af de enkelte funktioner er der lavet en test for at sikre, at funktionen virker efter hensigten. Først når denne test er godkendt, påbegyndes arbejdet med den næste funktion. Eksempelvis er FFT og THD funktionerne sammenholdt med resultater fra Matlab.

Efter udviklingen af den samlede Måleenhed er der lavet en modultest. Modultesten indeholder test af spændings-, strøm-, power factor- og THD-målingerne. For specifikation af tests og resultater henvises til dokumentationen<sup>9</sup>.

## 6.7 Delkonklusion

Måleenheden er implementeret på en PSoC, da denne indeholder en ADC, som kan omsætte de analoge spændingssignaler til digitale værdier, som kan behandles i PSoC'ens processor.

Spændingssignalerne ligger ikke inden for ADC'ens input range, så der er implementeret hardware til at forstærke og dæmpe signalerne, så de passer til ADC'ens range. Hardwaren har en begrænsning, da den ikke kan måle differentielt, hvilket betyder, at der måtte laves ændringer i den centrale måling.

Ved at lave FFT på de samlede værdier har det været muligt at beregne værdier for spænding, strøm, indholdet af harmoniske og power factor. Til angivelse af hvor stort et indhold af harmoniske, der er i signalet, er formelen for Total Harmonic Distortion anvendt.

Den færdige Måleenhed opfylder de krav, der er specificeret i dokumentationen<sup>10</sup>

<sup>9</sup>Projektdokumentation, 9.3, Modultest

<sup>10</sup>Projektdokumentation, 3.4.3, Måleenhed

## Kapitel 7

# Design af Styringsenhed

I dette afsnit vil der blive gået i dybden med den samlede Styringsenhed. Herunder vil der blandt andet være fokus på nogle af de valg, der er taget både før og i løbet af designfasen for Styringsenhed og de enkelte moduler, den består af. Derudover vil selve implementeringen af Styringsenhedens software på dens processorere være beskrevet, men der vil i rapporten kun blive beskrevet centrale dele og udvalgte eksempler. Styringsenheden er udviklet med henblik på sikker og overskuelig brug, pålidelig datatransmission og at softwaren skal være nem at videreudvikle med henblik på udvidelse af antallet af Måleenheder. Med sikker brug menes at systemet altid er et stabilt sted, før en ny ændring kan forekomme.

Der refereres til dokumentationen<sup>1</sup> for at se det fulde designafsnit for Styringsenhed.

### 7.1 Foranalyse

#### 7.1.1 Kontrolmodul og Brugergænseflade

Det er en oplagt mulighed at anvende en PLC og et HMI som Kontrolmodul og Brugergænseflade i projektet. Dette skyldes, at der som krav til projektet skulle anvendes relevante faglige elementer fra semesterets kurser. Faget Instrumentering og Automatisering(IOA) omhandler netop brugen af PLC og HMI i industrien. Hermed kommer to gode argumenter for PLC og HMI; relevant faglig viden anvendes, og i den virkelige verden ville det være oplagt at bruge lignende enheder til et projekt som dette.

PLC'en kan programmeres i flere forskellige sprog. Ladder er dog blevet valgt, fordi det er det mest anvendte i IOA. Desuden er det et krav til projektet, at en bruger skal kunne interagere med systemet, hvilket opnåes gennem HMI'et.

Kravet om pålidelig transmission af data mellem udvalgte enheder understøtter også valget af en PLC, da denne indeholder mulighed for LAN kommunikation gennem en RJ-45 port.

#### 7.1.2 Kommunikationsmodul

Det blev hurtigt i projektfasen valgt, at der skulle udvikles kommunikation over en LAN forbindelse, da det i projektet var et krav, at der skal være pålidelig transmission af data mellem udvalgte enheder. Der blev undersøgt hvilke muligheder, der var for at gøre kommunikation over en LAN forbindelse med en microcontroller mulig. Da gruppen tidligere har haft undervisning i PSoC og Arduino programmering blev der i værkstedet bestilt et Ethernet shield til hver af disse. Men da Måleenheden bliver implementeret på en PSoC blev

---

<sup>1</sup>Projektdokumentation, 10, Design af Styringsenhed

det besluttet at prøve at implementere LAN kommunikationen på samme PSoC som en af Måleenhederne.

Arduinoen blev holdt som en back-up mulighed, da det er et lettere udviklingsmiljø og samtidig mere populært end PSoC-miljøet, hvorfor der også er mere hjælp at finde om Arduinoen på nettet. Det ville dog være nødvendigt at anvende en form for kommunikation mellem Måleenhederne og Arduinoen.

## 7.2 Kontrolmodul

Kontrolmodulet består af en Siemens PLC S7-1200 med signalmodulet AQ1x12BIT. Det kan tilgås gennem en switch af typen CSM 1277. Softwaren består af to dele; en kommunikationsdel med interface til kommunikationsmodulet og en kontrol del med interface til Trinskifter. Den detaljerede gennemgang af softwaren kan findes i dokumentationen.<sup>2</sup> Her vil i stedet blive lagt fokus på de overvejelser, der har været undervejs i designet af Kontrolmodulet. Kontrolmodulet er lavet i en OB, der looper. Heri er placeret fire FC'er, der er oprettet i forbindelse med kommunikationen og den FB, der er fremstillet til styring af Trinskifter.

### 7.2.1 Kommunikation

Datatransmission til Kontrolmodulet er en vigtig del af projektet, da dette forbinder sensorer i form af Måleenhederne med aktuatorer i form af Trinskifter. Derfor er der blevet lagt mange overvejelser i, hvordan kommunikationen skulle etableres.

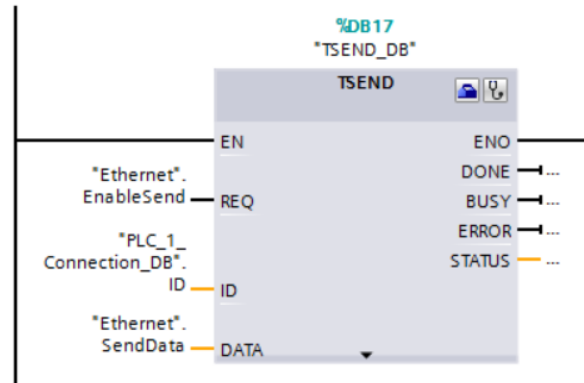
Først og fremmest skulle flere Måleenheder kunne kommunikere med det samme kontrolmodul, derfor var en switch i overvejelser, grundet der kun er én fri RJ-45 port på PLC'en. Dette var ikke umiddelbart muligt at fremskaffe hos værkstedet. For mere om løsningerne på dette, se afsnit 7.4.

Næste beslutning gik på valget af protokol til Ethernet kommunikation. TCP var det oplagte valg for at sikre pålidelig kommunikation, selvom UDP også var en kendt protokol fra faget Internet kommunikationsnetværk(IKN).

Udvilingsværktøjet TIA Portal V13 har gode muligheder for at sætte TCP kommunikation op til forskellige ikke Siemens produkter gennem dets open user communication. Først blev blokkene TSEND\_C og TRCV\_C forsøgt anvendt. Disse blokke har dog indbygget funktionalitet i forbindelse med at oprette og nedlægge forbindelsen, hvilket var uhensigtsmæssigt, når der skulle være en flydende datastrøm. Det endelige valg blev derfor blokkene TCON, TDISCON, TSEND og TRCV, hvor man som programmør kan styre oprettelse og nedlæggelse af forbindelsen med TCON og TDISCON. På figur 7.1 ses blokken TSEND som et eksempel på open user communication blokkene.

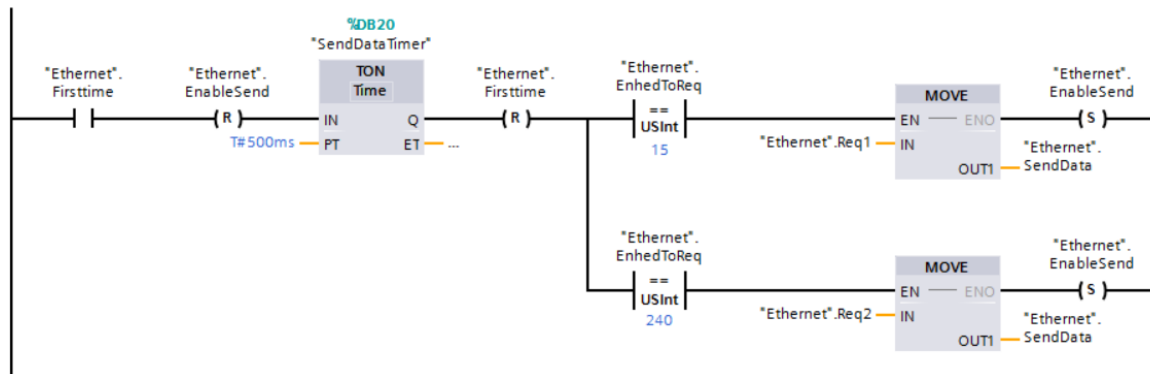
---

<sup>2</sup>Projektdokumentation, 10.1, Kontrolmodul



Figur 7.1: Blokken TSEND

Med en pålidelig og testet TCP kommunikation var de næste overvejelser angående styringen af disse blokke. Her blev det besluttet, at et client/server forhold ville være bedst. Kontrolmodulet er i den sammenhæng client og skal forespørge data fra serveren, Kommunikationsmodulet. Da systemet ikke er et beskyttelsessystem, kræver det ikke hurtig reaktion mellem sensor og aktuator. Derfor blev det valgt, at det kun var nødvendigt at opdatere data hvert 2 sekunder. Dette blev realiseret med to separate netværk; et tilknyttet FC'en med TSEND og et tilknyttet FC'en med TRCV. På figur 7.2 ses netværket tilknyttet TSEND.



Figur 7.2: Netværket der styrer hvilken enhed der forespørges data fra

FC'er er valgt, da tanken var at hukommelsen skulle ligge andetsteds i koden. Det er dog blevet nødvendigt at oprette en global DB for at kunne styre variable i forbindelse med styring af kommunikationen. For yderlige uddybelse, se dokumentationen<sup>3</sup>.

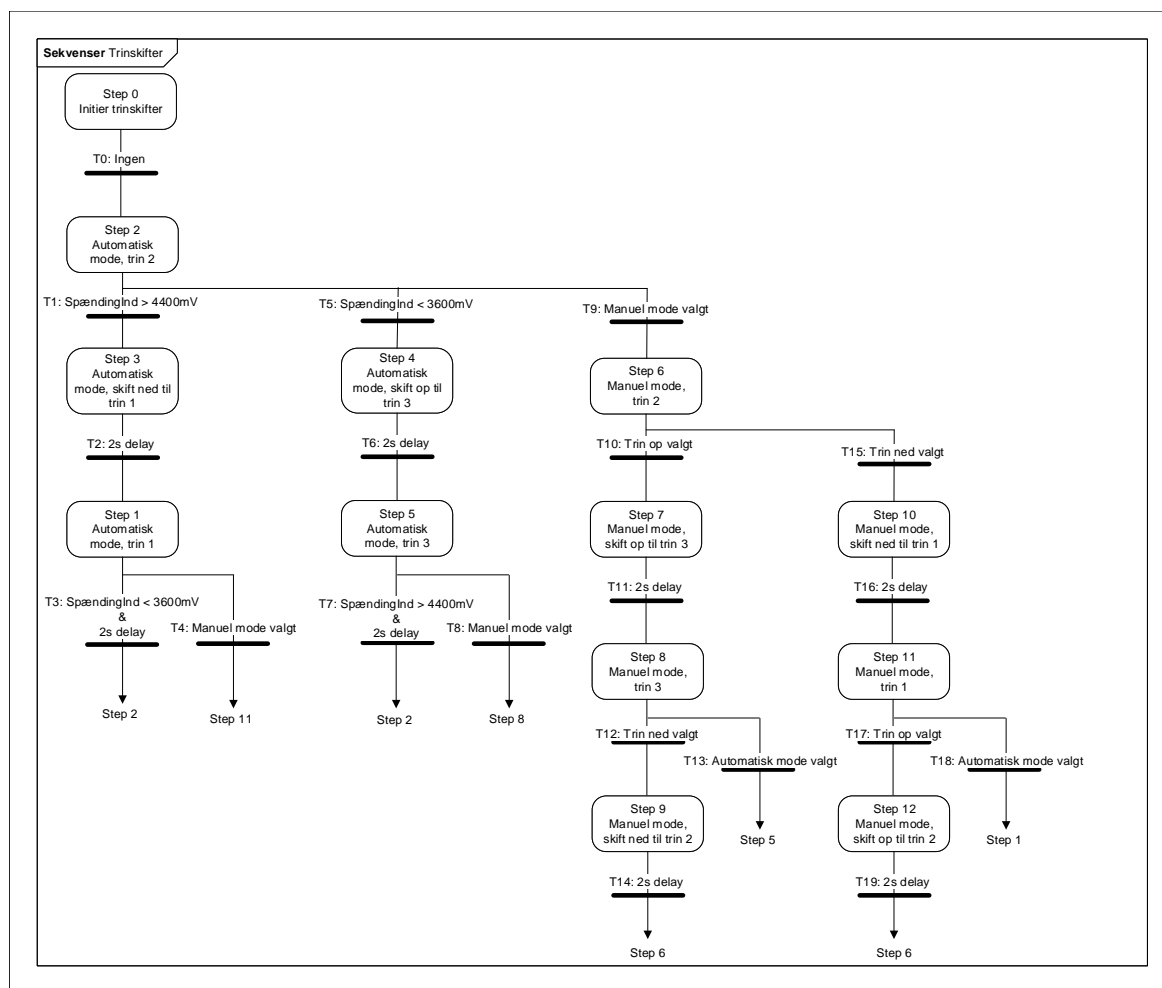
Det er vigtigt at pointere, at systemet skal være nemt at udvide til at understøtte mange Måleenheder i den virkelige verden. Det vil udvide tiden, det tager at eksekvere programmet, men er nemt, da der ikke skal ændres i selve kommunikationen, men kun i de netværk, der styrer kommunikationen, hvor der her skal tilføjes flere forgreninger.

## 7.2.2 Styring af Trinskitter

Angående styring af Trinskitteren blev det tidligt besluttet at benytte dens digitale 24VDC udgange på Q0.6, Q0.7 og Q1.0 til styringen af relæerne på Trinskitter. Der henvises til Trinskitter for mere om relækredsløbet, se afsnit 5.3. Samtidig er projektet proof of concept,

<sup>3</sup>Projektdokumentation, 10.1.1, TCP kommunikation

så det er kun spændingsmålinger fra én forbruger, der vil blive reguleret med hensyn til. Dette simplificerer den FB, der udvikles til denne styring væsentligt, da der kun er et input. På 7.3 ses et diagram over sekvenserne og flowet imellem dem for FB'en Trinskipper.



Figur 7.3: Diagrammet viser FB'en Trinskipperes sekvenser

Første tanke i forhold til denne blok var, at den hovedsageligt skulle være automatiseret. Derfor er det besluttet, at koden blev skrevet som sekventiel, hvor en lokal static Step står for at styre, hvilken sekvens der er aktiv. Dette sikrer også imod fejl, da systemet har få muligheder videre fra hvert step. Samtidigt er koden opdelt i sekvenser af trin og trinskip. Der er 3 trin, som hver især er tilknyttet en af udgangene på PLC'en. For trin 2 er der både mulighed for et trinskip op og ned, mens der for ydertrinene kun kan skiftes ned/op til trin 2. Det er kun, når koden er i et trin, at man kan skifte mellem automatisk og manuel tilstand. I automatisk mode er der dog to undtagelser i trin 1 og trin 3, hvor trinskipet er lagt sammen med trinnet. Disse trinskip burde have været flyttet til deres egen sekvens for at undgå at et trinskip og et tilstandsskip kan forekomme samtidigt.

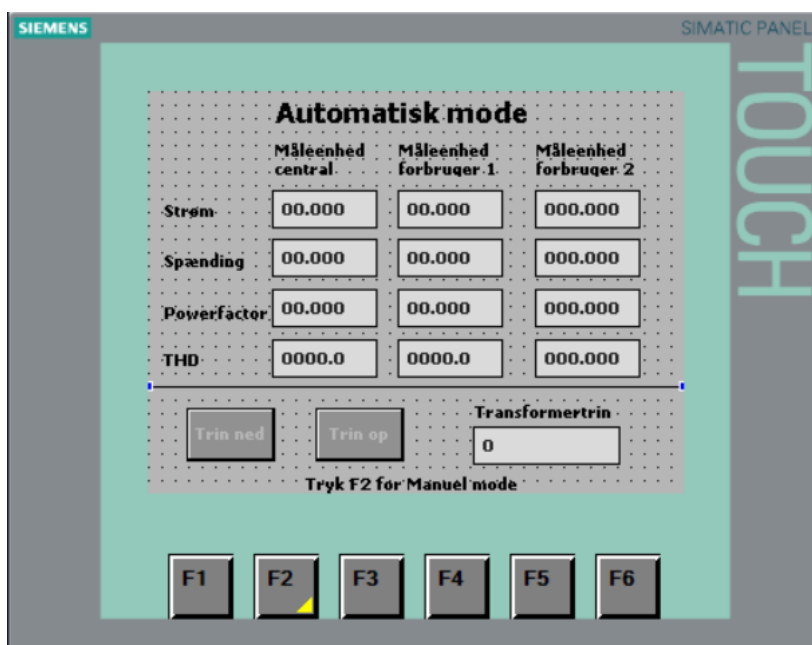
I første udkast til blokken var der ikke taget højde for at programmet blev eksekveret hurtigere end data blev opdateret, derfor kunne programmet nå at skifte flere trin på den samme måling, hvilket vil skabe et ustabilt system, for når det havde lavet et dobbeltskip, vil det så få en ny måling, der indikerer skift i modsat retning. Denne fejl er fjernet ved at indsætte et delay, når systemet kommer i et nyt trin, da der hentes ny data hvert 2 sekunder, er dette delay sat til 2,5 sekunder.

En vigtig pointe at få med er, at forbrugeren aldrig må miste forsyning. Så et trinskit indebærer et overlap imellem de trin, der skiftes fra og til på 2 sekunder. Herved er der altid forsyning på distributionslinjen. Selve overlappet set fra trintransformeren uddybes i afsnit 5.3.2. For mere om styringen af trinskitteren, se dokumentationen.<sup>4</sup>

### 7.3 Brugergrænseflade

Brugergrænsefladen i dette projekt er designet på en HMI KTP 600. Den kan tilgås gennem en switch af typen CSM 1277. I dette afsnit vil overvejelser omkring HMI'et blive gennemgået. Koden og opsætningen er forklaret i dokumentationen.<sup>5</sup>

Systemet, der udvikles, skulle være operatørvenligt, hvilket har været grundlag for mange beslutninger omkring HMI'et. Det skal være let at gennemskue, og der skal kun være de mest nødvendige funktionaliteter for at give overblik. Der er derfor fremstillet to skærme; Automatisk mode og Manuel mode. Der er få forskelle på de to, men det tydeliggør for operatøren, hvilken tilstand der er aktiv. Skærmen for Automatisk mode kan ses på figur 7.4. Skærmen for manuel mode kan findes i dokumentationen<sup>6</sup>.



Figur 7.4: HMI i automatisk mode

På begge skærme vises data for Måleenhederne i kolonner og rækker for at give overblik. En mangel her er, at det ikke er vist, hvilken enhed dataet vises i. For spænding er det i volt, strøm i ampere, power factor er enhedsløs og THD vises som det samlede indhold af frekvenser i procent af den fundamentale frekvens. THD er forklaret i afsnit 6.3.

Under skillelinjen ses al information omkring Trinskitteren. I automatisk mode er det ikke muligt at skifte trin på knapperne Trin ned og Trin op, derfor er de gråskalerede. I manuel mode er de sort/hvid for at vise, at de kan benyttes.

Knappen til tilstandsskift er på hver skærm placeret på F-knapperne med tilhørende forklarende tekst på skærmen for at tydeliggøre funktionaliteten af knapperne.

<sup>4</sup>Projektdokumentation, 10.1.2, Styring af Trinskitteren.

<sup>5</sup>Projektdokumentation, 10.2, Brugergrænseflade

<sup>6</sup>Projektdokumentationen, 10.2.2, Manuel mode

Systemet er klargjort til en central og to decentrale Måleenheder, men i det endelige produkt er kun en central og en decentral Måleenhed. Forbruger 2 er derfor ikke aktiv i produktet.

## 7.4 Kommunikationsmodul

I starten af projektet var det tænkt, at et separat kommunikationsmodul ikke var nødvendigt, da PSoC'en med et tilhørende Ethernetmodul ENC28J60, se bilag B4, ville kunne oprette forbindelse til Kontrolmodulet. Der var dog et problem med antallet af Måleenheder på denne måde, da PLC'en kun har ét frit RJ-45 stik ville det stadig være nødvendigt at benytte en switch eller at samle måledata på en enhed og derfra sende dem til PLC'en. Grundet det ikke var muligt at få en switch på værkstedet blev det besluttet at benytte en ekstra microcontroller til at samle data på. Denne microcontroller er Kommunikationsmodulet.

Da det ikke er en nødvendighed for projektet, at kommunikationen skal foregå hurtigt mellem Måleenhederne og Kommunikationsmodulet, er der her valgt at benytte UART kommunikation. Denne kommunikationsform er valgt, da det før har været benyttet på både Arduino og PSoC dog uafhængigt af hinanden. Samtidig er UART rigtig god, hvis der skal tilføjes flere enheder senere, da det kun kræver en lille opdatering i protokollen, således hver enhed får en unik adresse.

Efter mange timers arbejde med at oprette LAN kommunikation på en PSoC og det stadig ikke var lykkedes, blev det besluttet, at der skulle prøves med en Arduino som Kommunikationsmodul i stedet.

Kommunikationsmodulet består derfor af en Arduino Mega2560 forbundet til et Ethernet Shield R3. Kommunikationsmodulet skal derved modtage data fra Måleenhederne over UART kommunikation og sende det videre til Kontrolmodulet ved brug af TCP kommunikation.

Arduinoen opsætter Ethernet Shield'et ved brug af en SPI forbindelse, der oprettes af SPI.h biblioteket, der kaldes som det første i koden. Dernæst er Ethernet.h biblioteket kaldt for at kunne benytte de meget brugbare funktioner i dette bibliotek[1]. Der ses herunder et eksempel på hvordan funktionerne er benyttet til at opsætte TCP serveren, der er en meget essentiel del i kommunikationsmodulet, se kodeeksempel 7.1. For mere uddybelse af hele koden refereres der til dokumentationen<sup>7</sup>.

Listing 7.1: Ethernet

```
// Skrevet i den globale del af koden:
#include <SPI.h>
#include <Ethernet.h>

byte mac[] = {0x90, 0xA2, 0xDA, 0x0F, 0x1B, 0x82}; // MAC Address
byte ip[] = {192, 168, 0, 129}; // Network Address

EthernetServer server = EthernetServer(27015);

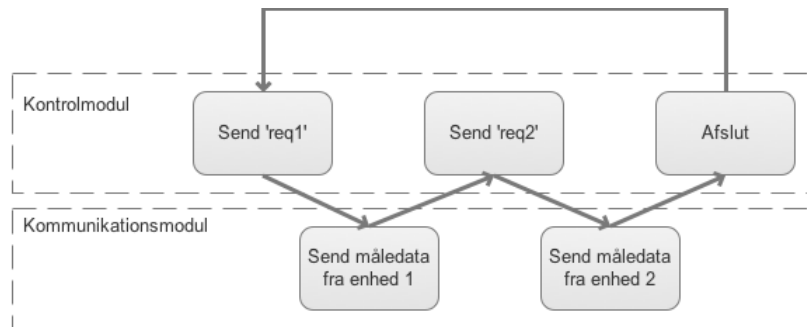
// Skrevet i setup delen af koden:
Ethernet.begin(mac, ip);
server.begin();
```

Kommunikationen over TCP mellem Kommunikationsmodul og Kontrolmodulet starter ved, at Kontrolmodulet opretter forbindelse til Kommunikationsmodulet. Dette detekteres

<sup>7</sup>Projektdokumentation, 10.3, Kommunikationsmodul



af Kommunikationsmodul, og den starter med at modtage request kommandoer fra Kontrolmodul. Hver Måleenhed har en unik request kommando. I dette tilfælde er der brugt 'req1' og 'req2' for de to Måleenheder. Når Kommunikationsmodul modtager 'req1' sendes dataene fra den tilsvarende Måleenhed til Kontrolmodul. Måledataene sendes videre præcis, som de er modtaget. Det vil sige, at hver måling sendes som to 8-bit integers, men da alle målinger sendes efter hinanden refereres de til som måledata. Se figur 7.5.



Figur 7.5: Protokol for kommunikation mellem kommunikationsmodul og kontrolmodul

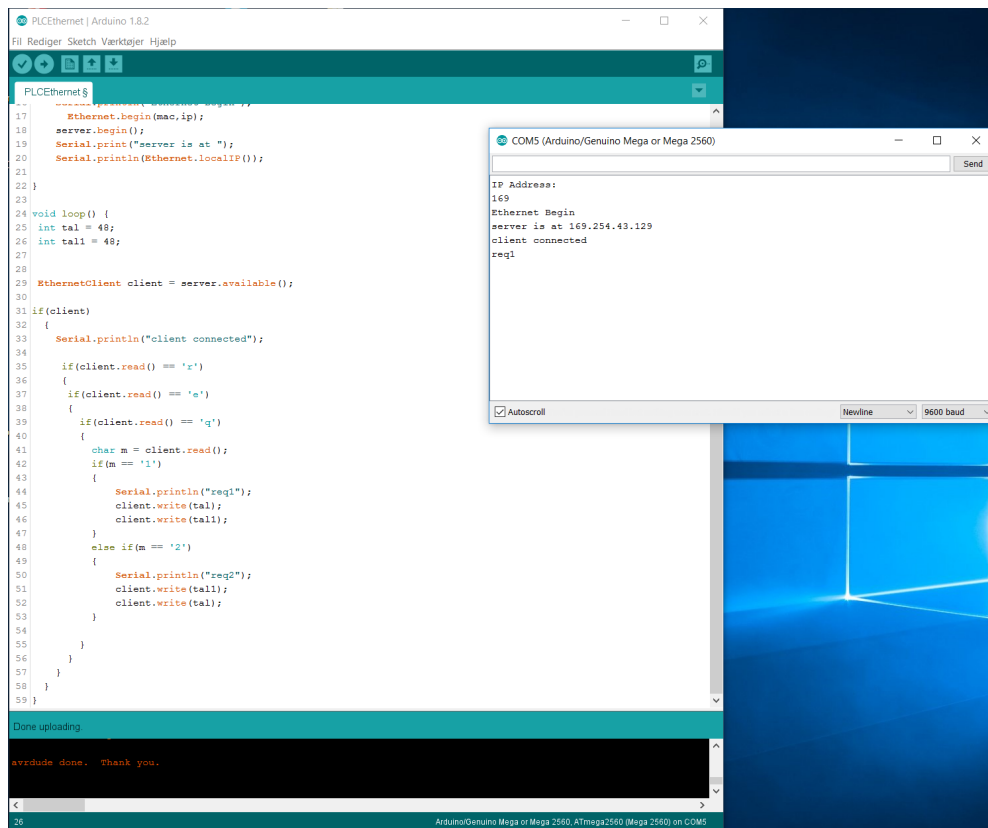
## 7.5 Test

I dette afsnit vil der ikke blive gået i dybden med de enkelte tests, men derimod selve testprocessen og tankerne gjort i testfasen. For at se mere om de enkelte udførte test, se dokumentationen<sup>8</sup>.

Da Styringsenheden generelt har indeholdt meget programmering, har det været oplagt at teste funktionaliteten af koden på nogle enheder på andre allerede udviklede og testede moduler i projektet. Eksempelvis er funktionaliteten af Brugergrænsefladen testet med brug af andre allerede testede moduler. Til testen af Brugergrænsefladen er kommunikationen fra Måleenhed til Kommunikationsmodul og videre til Kontrolmodul brugt for at generere tilfældige data, der så blev sendt til og udskrevet på Brugergrænsefladen fra Kontrolmodul. Det samme gælder testen af Arduinoens TCP modtagefunktion. Her er PLC'en benyttet med et testprogram, der kan sende 'req1' kommandoen. Da man allerede har testet PLC'ens forbindelse på et andet WinSock testprogram[7], kan testen fokusere på Arduinoen. Herunder ses et enkelt testeksempel, hvor PLC testprogrammet har været benyttet, se figur 7.6. For hele testbeskrivelsen refereres til dokumentationen<sup>9</sup>.

<sup>8</sup>Projektdokumentation, 10.4, Modultest

<sup>9</sup>Projektdokumentation, 10.4.1, Kontrolmodul



Figur 7.6: Test af Arduinoens TCP datamodtagelse

## 7.6 Delkonklusion

Styringsenheden har haft tre gennemgående fokuspunkter; sikkerhed og overskuelighed, pålidelig kommunikation og mulighed for nem udvidelse af softwaren til data fra flere Måleenheder.

I kontrolmodulet var Trinskitter en funktionsblok, der på sikker vis bragte systemet rundt mellem sekvenser, herfor opdelt i tilstande, trin og trinskit. Samtidig skulle kommunikationen være pålidelig, hvilket førte til valget af TCP og separate netværk, der styrer data sendt, og hvor data skal gemmes. De separate netværk gør det også nemt at udvide med flere kommandoer og steder at gemme modtaget data.

Brugergrænsefladen blev udviklet med henblik på brugervenlighed og simplicitet samtidig med, at den indeholder mange informationer om systemet. Det er her også vist, at der er mulighed for udvidelse. Dog er der en fysisk begrænsning i forhold til plads på skærmen brugt i produktet.

Kommunikationsmodulet har løst opgaven om at lave en overgang fra en kommunikationsform, UART, til en anden, TCP. Dette platformsinterface er et kritisk punkt for den pålidelige kommunikation. Her er koden igen udviklet, så flere enheder kan tilkobles. En ændring i opsætning af UART forbindelse vil gøre, at stadig kun en Arduino er nødvendig for at muliggøre tilføjelsen af mange flere Måleenheder.

## Kapitel 8

# Resultat og diskussion

I dette kapitel holdes resultaterne for Spændingsregulatoren op imod den udformede kravspecifikation. Resultaterne vil blive diskuteret i forhold til, hvorledes kravene er opfyldt, og om løsningen er optimal. I kravspecifikationen er kravene delt op i funktionelle og ikke funktionelle krav. Det er lykkedes at opfylde alle kravene stillet i de funktionelle krav, hvorimod der er enkelte krav i de ikke funktionelle, som ikke er opfyldt.

Det overordnede formål med udviklingen af prototypen for systemet er at bevise funktionaliteten og anvendeligheden af Spændingsregulatoren. Dette er fuldt ud lykkedes. Simuleringen af distributionslinjen er udviklet således, at Spændingsregulatorens evne til at overvåge og regulere spændingen i systemet tydeligt kommer til udtryk. Måleenheden er i stand til at måle spændingen ude ved forbrugeren og sende de målte data til Styringsenheden. Reguleringen af spændingen foretages på baggrund af de målte data og kravet om  $\pm 10\%$  af 4V ved forbrugerne. Det er hermed bevist, at Spændingsregulatoren er i stand til at holde spændingen stabil i et system ved varierende belastninger.

Kommunikationen mellem Måleenheden og Styringsenheden krævede, at der blev udviklet et modul, som kan kommunikere med en Siemens PLC. Dette modul er essentielt for, at Spændingsregulatoren fungerer som helhed. Anvendelsen af TCP-protokollen gjorde det muligt at udveksle data mellem modulet og PLC'en.

Den automatiske regulering er udviklet på baggrund af forholdsvis simpel model, hvor der skiftes i trin, når spændingen rammer et specifikt niveau. Dette kunne optimeres med en form for hysteres, tjekker spændingsniveauet i en bestemt tid, inden et trinskrift vil ske. Det ville give et mere stabilt system, da Spændingsregulatoren ville skifte op og ned i trin ved blot små ændringer omkring grænseværdierne mellem hvert trin. Det er dog ikke noget problem med projektets simulerede belastninger, da de springer i tilpas store trin til ikke at variere hele tiden.

Forbrugerne er dimensioneret efter at kunne trække en maksimal strøm i systemet på 500mA. Dette har dog vist sig ikke at kunne lade sig gøre, da Spændingsregulatoren ikke kan opretholde 4V ved forbrugerne, når alle forbrugere tilkobles. Det blev ikke fundet relevant at implementere en løsning, men kunne have været løst ved at inddrage flere trin på transformeren.

Der er udviklet en prototype, der med stor tilfredshed har kunnet simulere en løsning på problemformuleringen. I forhold til accepttesten<sup>1</sup> har Spændingsregulatoren bevist, at der kan skiftes trin på transformeren manuelt eller automatisk alt efter hvor stor belastning, der er i systemet. Derudover har den vist sig at kunne måle strøm og spænding i det simulerede system med høj præcision.

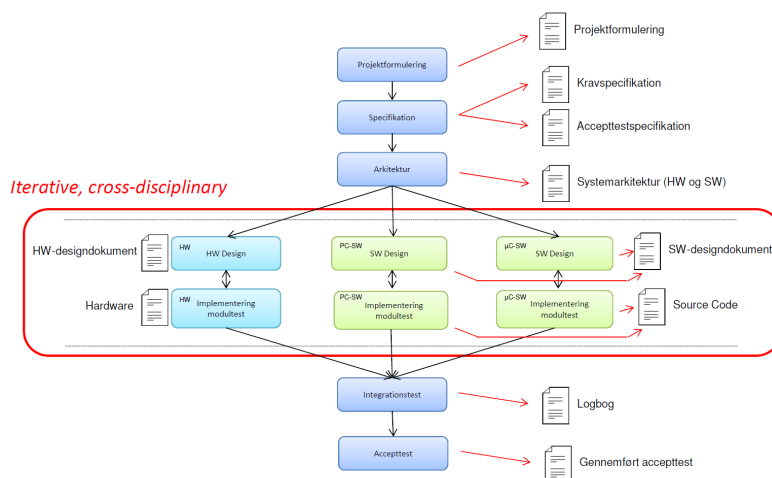
---

<sup>1</sup>Projektdokumentation, 12, Accepttest

## Kapitel 9

# Metode og proces

Til gennemførelse af dette projekt er ASE-modellen blevet anvendt som udgangspunkt. Denne model viser de forskellige faser, projektgruppen skal igennem på vejen mod et endeligt produkt og en veldokumenteret og gennearbejdet rapport. ASE-modellen ses på figur 9.1 Gruppen har desuden anvendt en iterativ og empirisk arbejdsmetode. Der er brugt faglitteratur og teori fra undervisningen til at danne vidensgrundlag for projektet om spændingsregulatoren. Undervejs er der indsamlet nye erfaringer i forbindelse med udviklingen af produktet. I udviklingsfasen er der anvendt SysML og UML, der sammen med Use Casene har givet overblik over systemet både grafisk og skriftligt. Dette har dannet grundlag for opbygningen af systemet.



Figur 9.1: ASE-modellen

For at styre og lede projektet har gruppen ladet sig inspirere af Scrum principperne. Fra starten af projektet har gruppen oprettet sprints og defineret dertilhørende opgaver. Gruppen har ikke afholdt daily scrums, men har gennemsnitligt haft 1-2 ugentlige gruppemøder samt ugentligt vejledermøde. Gruppen udarbejdede desuden en tidsplan for udvikling og rapport-skrivning, se bilag C5. Dette har medført en jævn arbejdsgang og et godt flow i projektet.

Efter udfærdigelsen af arkitekturen for Spændingsregulatoren afholdt gruppen review med en anden projektgruppe. Efter rettelser herfra blev gruppen inddelt i tre hold med hvert sit ansvarsområde. Gennem design og implementeringsfasen har hvert hold haft ansvar for eget arbejdsområde, men den resterende del af gruppen er løbende blevet opdateret i forhold til udfordringer og løsninger. Ved integrationstest og accepttest er gruppen igen samlet, og disse

udføres i fællesskab. Holdinddelingen og ansvarsområder ses i Tabel 9.1.

Tabel 9.1: Arbejdsfordeling

Navn	Arbejdsområde
Jeppe Hansen Søren Jensen	Måleenhed
Laurids Givskov Jørgensen Dennis Slot Larsen	Styringsenhed
Caroline Møller Sørensen Sophia Amalie Mortensen	Distributionslinje, belastning og trinskifter

## 9.1 Udviklingsværktøjer

**PSoC Creator** anvendes til udvikling af software til Måleenhed.

**Multisim** anvendes til at simulere diverse kredsløb til systemet.

**TIA portal V13** anvendes til programmering af PLC.

**Visuel studio 2013** anvendes til testprogram for styringsenhed.

**Arduino 1.8.2 software** anvendes til udvikling af program til Arduino.

## Kapitel 10

# Fremtidigt arbejde

For at få større udbytte af de data, der kommer fra Måleenheden, kunne det være interessant at tilføje elementer, der vil påvirke systemet i højere grad end prototypens simulering af en distributionslinje og forbrugere.

Da der i det eksisterende system ikke ses en stor påvirkning af power factor, kunne en højere grad af spolevirkning implementeres. Dette ville vise, hvorledes Distributionslinjen påvirker power factoren, og hvordan Måleenheden overvåger systemet. Dog vil det kræve en væsentlig større spole, og teorien for en kort linjemodel ville formodentlig ikke gælde, så dette ville hovedsageligt være for at tydeliggøre funktionaliteten af Måleenheden.

Foruden yderligere spolevirkning, kunne det være relevant at tilføje en eller flere decentrale producenter i systemet og observere påvirkningen herfra. En eventuel løsning eller implementering af dette er dog ikke undersøgt nærmere, men ville være et bud på fremtidigt arbejde ud fra problemformuleringen.

Måleenheden virker til det projekt og dermed den prototype, der her er udviklet. Men i en forbedret prototype ville det være optimalt, at hardwaren blev ændret således, der blev benyttet en instrumentationsforstærker i stedet for den nuværende hardwareløsning, således Måleenhed kunne måle differentielt og ikke skulle have et fikseret nulpunkt.

I forhold til Kommunikationsmodulet i projekt er det desværre tydeligt at se, at der er brugt meget arbejde på at udvikle TCP kommunikation på en PSoC i starten af projektet. Dette har medført, at enkelte ting, der ville være nødvendige i en færdig prototype, ikke er blevet implementeret.

Deriblandt kan for eksempel nævnes, at som prototypen fungerer, er der ingen behandling af forkerte måledata. Dette kunne for eksempel implementeres ved at lave et gennemsnit over flere målinger, hvilket ville gøre uregelmæssige målingers påvirkning på systemet mindre. Helt forkerte data, grundet f.eks. støj på transmissionen kunne fjernes, ved at se på hvilket interval realistiske målinger ville ligge i. En log af dataet kunne eventuelt tilføjes prototypen, så man kunne bruge den til at observere, hvordan systemet reagerer over en længere periode og derved forbedre systemet.

Derudover er der i dette projekt benyttet UART mellem Måleenhederne og Kommunikationsmodulet, men der burde i en realiseret Spændingsregulator blive benyttet en anden form for kommunikation, der kan levere pålidelig data over store afstande. Her ville det være essentielt at koble Måleenhederne og Kommunikationsmodulet på internettet.

Derimod vil det være forholdsvis let at indsætte flere måleenheder både i prototypen, men også i en realiseret Spændingsregulator. Dette skyldes brugen af Kommunikationsmodulet, der samler alle data fra Måleenhederne og sender dem til Kontrolmodulet. Det ville være nødvendigt at ændre lidt i koderne for at tilføje flere enheder, eksempelvis protokollen imellem Kontrolmodul og Kommunikationsmodulet skal udbygges således, der bliver efterspurgt data fra flere enheder.

# Kapitel 11

## Perspektivering

I dette afsnit vil overvejelser omkring hvad Spændingsregulatoren kan bidrage med til det eksisterende distributionsnet blive beskrevet. Ligeledes vil overvejelser omkring styrker, svagheder og relevans af Spændingsregulatoren blive diskuteret. Her er det konceptet for Spændingsregulatoren, der diskuteres og ikke selve prototypen, der er udviklet.

Dette projekt er udarbejdet med udgangspunkt i problemformuleringen, men for at få en bedre forståelse for, hvordan denne problemstilling løses i dag, tog projektgruppen kontakt til energiselskabet Eniig. Efter besøg på en af deres transformerstationer viste det sig, at den regulering, der i projektet, laves på distributionssiden, ikke foretages her i virkeligheden. Her laver man i stedet trinskit ved 60/10 kV transformere og opretholder på denne måde en stabil forsyning hos forbrugerne. Som elnettet ser ud nu, kunne det derfor godt virke overflødigt at installere Måleenheder hos hver enkelt forbruger, da deres krav allerede er opfyldt. Hvis man kigger længere ud i fremtiden kunne man dog godt forestille sig et andet scenarie. Hvis eksempelvis flere og flere danskere begynder at køre elbiler, der skal oplades med jævne mellemrum, ville dette medføre endnu større og mere varierende belastning end i dag. Her ville Spændingsregulatoren give mulighed for at overvåge tilstanden hos den enkelte forbruger og regulere, således at det påkrævede spændingsniveau opretholdes. Med udgangspunkt i måling af værdier hos forbrugerne kunne man også forestille sig, at Spændingsregulatoren kunne have relevans i forhold til implementering af smart grid. På denne måde kan Spændingsregulatoren bidrage til optimal udnyttelse af tilgængelige ressourcer og optimering af elnettet.

Foruden mere variation i belastningen er det også klart, at der i fremtiden vil være endnu flere decentrale producenter, eksempelvis i form af solcelleanlæg og vindmøller. Her kunne man forestille sig, at harmoniske ville blive et problem, der kunne medføre unødigt slid på transformere. Efter snak med Eniig viser det sig dog, at dette problem ikke er så stort i distributionssystemer på nuværende tidspunkt. De decentrale producenter medfører til gengæld en udfordring i forhold til overspænding. Disse overspændinger kan medføre overbelastning og varme i kabler og udstyr. Denne problematik er dog ikke behandlet i prototypen, men ville være relevant at undersøge.

I forhold til selve implementeringen af Spændingsregulatoren ligger også nogle udfordringer. Først og fremmest vil det kræve en del udvikling af prototypen, inden den kan integreres på det eksisterende elnet. Her tænkes både på, overholdelse af gældende standarder, sikkerhed for forbrugere og økonomi. Udnyttelse af Spændingsregulatoren vil kræve, at der installeres en Måleenhed hos hver enkelt forbruger, men dette kan medføre høje omkostninger i forbindelse med produktionen. Disse omkostninger skal holdes op mod, hvad man mener at kunne vinde på implementeringen af konceptet.

## Kapitel 12

# Konklusion

Projektets formål har været at undersøge, hvordan spændingen kan holdes stabil i et system med varierende belastninger. Dette blev løst ved at udvikle en Spændingsregulator, der kan skifte spændingsniveauer på en trintransformer og derved sikre en stabil spænding hos forbrugerne, selvom forbruget ændres. Regulering på lavspændingsnettet har dog vist sig ikke at være relevant i det danske distributionssystem, men projektets overordnede proof of concept er gennemført. Det er implementeret, at Spændingsregulatoren kan observere THD i systemet. Dette har dog også vist sig ikke at være nødvendigt på distributionsnettet. Det kan derfor konkluderes, at det på nuværende tidspunkt ikke er relevant at implementere Spændingsregulatoren i det danske elnet, men at det i fremtiden måske kan blive en del af en smart grid løsning. Projektgruppen har dog løst problemformuleringen og opfyldt kravene til projektet. Gruppen er desuden stolte af, at have fået systemet til at fungere automatisk, selvom det var nedprioriteret i MoSCoW'en. Gennem projektforsløbet har gruppen fået kendskab til problematikker og udfordringer i det danske elnet samt fået erfaringer inden for kommunikationsprotokoller, PLC programmering og påvirkning fra harmoniske.

Gruppen har desuden opnået en indsigt, der har gjort, at alle medlemmer har kunne se mulige forbedringer til den udviklede prototype, som ville være oplagte at arbejde videre med, hvis projektet skulle fortsættes.

Der er lavet et grundigt forarbejde og en fornuftigt arbejdsfordeling, hvilket har medført, at tidsplanen er overholdt og et tilfredsstillende resultat er opnået. Opgaver i forbindelse med udviklingen af Spændingsregulatoren har været uddelt i tre hold. Der har været god kommunikation holdene imellem, hvilket har givet en forholdsvis nem integrationsfase uden de store udfordringer. Samlet set har gruppen fået et godt udbytte af projektet både fagligt og inden for projektstyring.



# Bibliografi

- [1] *Arduino Ethernet.h library*. URL: <https://www.arduino.cc/en/reference/ethernet> (sidst set 13.04.2017).
- [2] *Basics of how to minimize harmonics*. URL: <http://www.csemag.com/home/single-article/basics-of-how-to-minimize-harmonics/c380220aa9d5effad076ec7e77b903d4.html> (sidst set 23.05.2016).
- [3] *Cypress forum*. URL: <http://www.cypress.com/forum/psoc-5-device-programming/how-implement-fft-psoc5> (sidst set 10.04.2017).
- [4] *Harmonics - Youtube*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=ZBRUG3wT3Yg> (sidst set 23.05.2016).
- [5] *Shannons sampling theorem*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Nyquist%E2%80%99s\\_sampling\\_theorem](https://en.wikipedia.org/wiki/Nyquist%E2%80%99s_sampling_theorem) (sidst set 23.05.2017).
- [6] *Sikkerhedsstyrelsen*. URL: <https://www.sik.dk/Global/Publikationer/Artikler/Artikler-fra-Electra/2009/Spaendingsfald-kan-faa-konsekvenser-for-sikkerheden> (sidst set 23.05.2017).
- [7] *WinSock server testprogram*. URL: [https://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/ms737591\(v=vs.85\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/ms737591(v=vs.85).aspx) (sidst set 20.04.2017).