

KTH Kungliga tekniska högskolan

Examinator: Mårten Björkman, celle@csc.kth.se

Handledare: Mårten Björkman, celle@csc.kth.se

Författarens e-postadress: merchant@kth.se

Utbildningsprogram: Civilingenjör i datateknik, 300hp

Omfattning: 3205 ord inklusive bilagor

Datum: 2012-05-21

Kandidatexamensarbete inom
Datateknik, DD143X, 6 poäng

Energimätare

Energimätning i bilspormiljö

Sebastian Merchant

Sammanfattning

Målet med detta projekt har varit att konstruera en energimätare för elracebilar i en kompakt form som även har en bra precision. En prototyp utvecklades med hjälp av ett shuntmotsånd kopplat i low-side konfiguration. Detta Isolerades galvaniskt med hjälp av en optokoppler och en spänning till frekvenskrets. För att utföra alla mätningar och beräkningar användes en mikrokontroller från Atmel.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	ii
Innehållsförteckning	iii
1 Introduktion	5
2 Teori	6
2.1 Elektrisk energi.....	6
2.2 Strömmätning.....	6
2.3 Magnetfälts strömmätning.....	7
2.4 Resistiv strömmätning.....	7
2.4.1 High-side mätning.....	8
2.4.2 Low-side mätning.....	9
2.5 Galvanisk isolation.....	10
3 Metod	12
4 Konstruktion	14
4.1 Strömmätning.....	14
4.2 Filtrering och signal.....	14
4.3 Spänning till frekvens och galvanisk isolation.....	15
4.4 Mikrokontroller.....	16
5 Resultat	17
6 Slutsats	19
6.1 Förbättringar.....	19
Källförteckning	20

1 Introduktion

I dessa tider med stort miljötänk har diskussionerna kring bränslefordon varit stora. Detta har gjort att biltillverkare har startat forskning och produktionen av elbilar för att finna ett komplement till de klassiska bränslebilarna. Dock har utvecklingen inte kommit tillräckligt långt för att kunna konkurrera med bränslefordonen när det gäller att kunna färdas längre sträckor då deras batterier tar slut mycket fortare än vad till exempel bensinen i tanken gör. Detta har lett till att användarna vill kunna se hur mycket energi de har gjort av med vilket kräver en energimätare som loggar energiförbrukningen ur batteripacken.

Därför har det i detta projekt valts att konstruera en prototyp för energimätning som är framförallt lämpad för bilsportindustrin. Detta för att kunna göra energimätningar på racingelbilar och på så sätt kunna anpassa deras körstil till att vara så effektiv som möjligt. Prototypen kommer att konstrueras efter årets KTH Racing elbil 2012/2012. För att kunna optimera energiförbrukningen runt de fyra olika typerna av race som körs under formulastudent tävlingar. Den mest krävande av dessa fyra typerna är endurance racet vilket är ett 22km långt race där det är viktigt att komma först i mål med så låg energiförbrukning som möjligt.

Målet med detta projekt är att finna en lösning som skulle kunna användas i en eldriven formulastudentelbil för att kunna optimera körstilar, effektkontroll och motorstyrning efter bästa förmåga och energiförbrukning. Målet är även att konstruera en enhet för mätning i liten fysisk storlek för att spara vikt. Men även att uppnå precision.

Projektet avgränsar sig till att endast bygga en prototyp med hjälp av ett shuntmotstånd då det är enklast att konstruera och billigast. Prototypen begränsas även till att endast sända ut mätdata på RS232 till dator istället för att skicka ut det på CAN-bus vilket är standard i fordon.

2 Teori

I detta teorikapitel kommer grunderna och olika metoder för ström och energimätning beskrivas.

2.1 Elektrisk energi

Definitionen av Elektrisk energi är den effekt som har används under en viss tid. Detta mäts i Jule vilket är wattsekunder. Effekt är förhållandet mellan spänning och ström under en viss tidpunkt, vilket ger den momentana effekten just då. Vilket syns i formel 2.1.1.[1]

$$P=U \times I \quad (2.1.1)$$

Där U är spänningen, I är strömmen och resultatet P, effekten. Energin är alltså den effekt som har flödat igenom systemet under observations-tiden. Detta kan matematiskt beskrivas med integralen av effekt under observationstiden.[1]

$$E(\Delta t) = \int_{t_0}^{\Delta t + t_0} P dt \quad (2.2.1)$$

Formel 2.1.2 visar alltså att E är summan av den effekt, P, som är har används under tiden Δt . [1]

2.2 Strömmätning

Det finns tre olika metoder som vanligtvis används för strömmätning. Vilken som används beror helt på vilken miljö mätningen ska ske. Det är en mängd faktorer som spelar in i valet av metod. Dessa metoder bygger på antingen magnetfältsmätning, resistivitet eller optisk mätning. De tre olika metoderna med dess olika för- och nackdelar finns i tabell 2.2.1.[2]

Typ	Strömmättningsområde	Galvaniskt-isolerad	Precision	Kostnad
Magnetfält	väldigt låg/hög	Ja	medium	hög
Resistivitet	medium/hög	Nej	hög	låg
Optisk	medium/väldigt hög	Ja	låg/medium	låg/medium

Figur 2.2.1: Vedertagna strömmättningsmetoder, för- och nackdelar. [2]

2.3 Magnetfältsströmmätning

Magnetfältsmätning bygger på att man mäter det magnetfält som skapas runt de kablar som används i systemet. Magnetfält som genereras kommer alltid vara i proportion till den ström som flyter just där. Magnetfältet mäts oftast med en halleffektsensor som monteras runt den kabel som ska övervakas. Halleffektsensor är en sensor som ger ut en spänning beroende på magnetfälts styrka [2].

I och med att halleffektsensor endast detekterar magnetfält runt kablarna som ska övervakas så ger det fördelen att dessa alltid är galvaniskt-isolerade (se kap 2.5, galvanisk isolation) i sin natur [2]. Vilket i sin tur också betyder att dessa inte alls gör någon påverkan på systemet i sig utan kan monteras bredvid eller runt en kabel utan att behöva bryta kretsen på något vis. Nackdelen är dock att eftersom den mäter magnetfältet så kan magnetfält från andra håll också påverka sensorn till att ge fel värde. Moderna sensorer brukar dock vara så pass sofistikerade att de filtrerar ut det mesta av det kringliggande magnetfälten [3].

Denna metod brukar ofta vara mycket dyrare än de andra metoderna som kommer tas upp [2].

2.4 Resistiv strömmätning

Denna typ av mätning är den som brukar anses vara den enklaste och billigaste metoden. Den är också enligt definition den som är mest noggrann och linjär av dessa metoder [2]. Denna metod bygger på Ohms lag, formel 2.4.1.

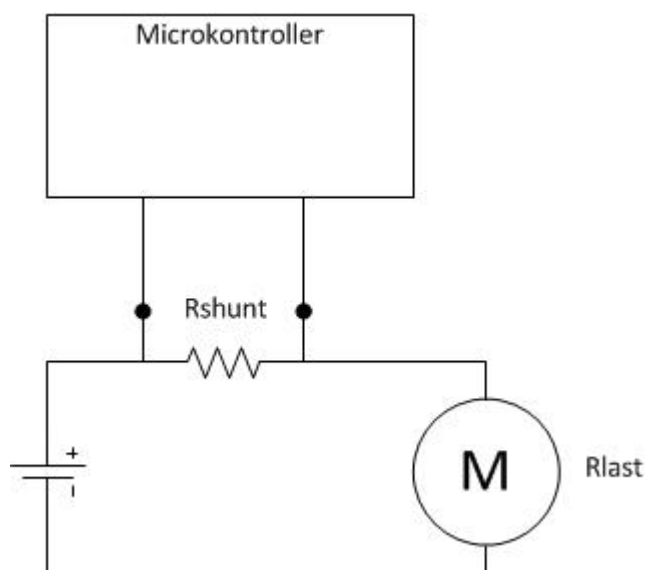
$$U = R \times I \quad (2.4.1)$$

Vilket säger att spänningen, U , är förhållandet mellan resistansen, R , och strömmen, I . Tillvägagångssättet i denna metod är att antingen sätta en resistans, kallad shuntresistor eller shuntmotstånd, med känt värde i serie före eller efter lasten i systemet. Spänningsfallet över denna resistor används sedan för att räkna ut den ström som flyter i kretsen.[4]

Fördelarna med denna lösning är att den är väldigt enkel och intuitiv att implementera. Denna metod omvandlar ström till spänning linjärt vilket kan vara till stor fördel. Nackdelarna med denna metod är dock att systemet påverkas när en resistans förs in i det. Denna resistans är viktig att den dimensioneras korrekt för att minska de effektförluster som uppstår när resistansen införs. Normalt är detta svårt för applikationer där höga strömmar flyter.[2]

2.4.1 High-side mätning

High-side mätning kallas det när shuntmotståndet monteras i serie före resten av systemet.



Figur 2.4.1.1: Schema över high-side mätning.

Figur 2.4.1.1 visar ett schema över hur shuntmotståndet ska kopplas i förhållande till resten av systemet, shuntmotståndet monteras helst direkt på plus polen på spänningskällan och innan lasten i systemet, R_{last} .

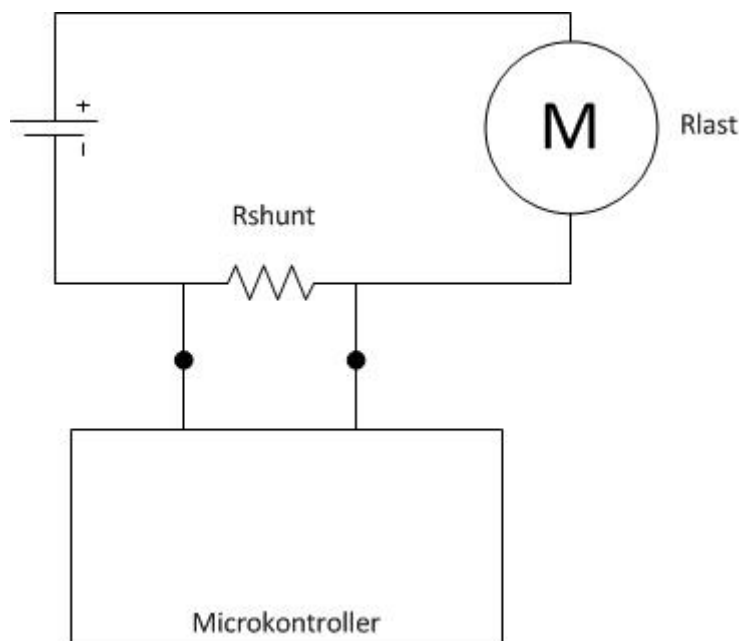
Fördelen med denna typ av mätning är att den inte påverkar något jordplan vilket kan vara en fördel i ett fordon där ofta komponenter jordas i chassit.[2] Denna typ av uppkoppling ger också fördelen att den

kan detektera eventuella fel som skulle kunna uppstå efter shuntmotståndet, som till exempel en kortslutning.[5]

Nackdelen med denna metod av mätning är att den kan vara svår att konstruera beroende på vad den nominella spänningen ligger på. Vid höga spänningar så betyder det att det även kommer ligga höga spänningar in till enheten som utför beräkningen. Detta är generellt ett problem då det kan vara svårt att hitta komponenter som inte påverkar signalen för mycket och skapar osäkerheter. Till exempel kan en spänningsdelning med motstånd i $M\Omega$ klassen med $\pm 10\%$ göra en stor påverkan på signalen.[5]

2.4.2 Low-side mätning

Low-side mätning är som det låter motsatsen till High-side mätning. I detta fall så kopplas shuntmotståndet i serie efter lasten i systemet.



Figur 2.4.2.1: Schema över low-side mätning

Figur 2.4.2.1 visar hur shuntmotståndet ska vara monterat i low-side fallet. Som synes så monteras shuntmotståndet efter lasten så nära minus/jord punkten som möjlig. Detta för att undvika att strömmar till jord går någon annan väg än igenom shuntmotståndet vilket skulle leda till osäkerheter i mätningen.[6]

Denna lösning är den enklaste av dessa två då ena sida av shuntmotståndet alltid kommer ha jordreferens. Vilket betyder att den andra

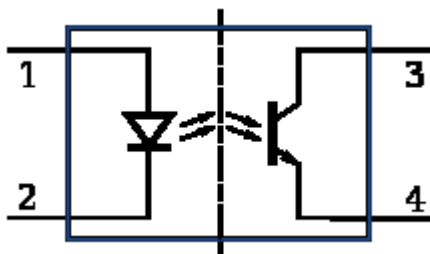
sidan av motståndet kommer ha en väldigt liten potentialhöjning jämfört med jord. Vilket i sin tur inte alls ger lika stora signaler in till mätningseenheten och på så sätt slipper göra spänningsdelningar som inför risker för fel.[2] De mindre signalerna gör det enklare att hitta komponenter och minskar risken för att införa fel i mätningen.[6]

Nackdelen är dock att det tillför en resistans mot jordplan.[6] Med denna metod går det heller inte att detektera eventuella kortslutningar och liknande.[4]

2.5 Galvanisk isolering

Galvanisk isolering används för att tillåta två system att kommunicera med varandra utan att vara elektriskt kopplade till varandra. Detta är viktigt då de olika systemen kan ha olika potential då de har olika spänningskällor. Om dessa två skulle kommunicera med varandra direkt så skulle det kunna leda till kommunikations fel eller att komponenter går sönder.[7] Det finns olika metoder att utföra det och två av dessa är att använda sig av optokopplare eller transformatorer.

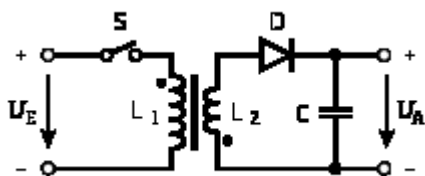
Optokopplare fungerar så att de använder ljus för att skicka signalerna till en ljuskänslig komponent på den andra sidan.[8]



Figur: 2.5.1 Överblick av optokopplare.[8]

Figur 2.5.1 visar en överblick av hur optokopplare generellt är konstruerade. Mellan pin ett och två sitter en LED som skickar ljus till den ljuskänsliga fototransistorn som sitter mellan ben tre och fyra.

Transformatorer använder sig av magnetfält för att överföra signaler och energi. De använder sig av två eller fler spolar som är lindade nära varandra. Den ena spolen skapar ett magnetfält som den andre reagerar på.[9]



Figur 2.5.2: Överblick av en transformator.[9]

Figur 2.5.2 visar en bild av hur den vanligaste typen av galvanisk isolering utförs med hjälp utav transformatorer.[9]

3 Metod

Projektet är en sammanställning av en webbaserade källor, webbsidor och rapporter. Detta för att snabbt få idéer hur en prototyp av en energimätare skulle kunna konstrueras. Valet av metod har varit en kritisk del för att kunna skapa en simpel konstruktion och samtidigt hålla priset nere.

För att mäta den ström som flödar i systemet så valdes det att gå efter den metod som beskrivs i kap. 2.4 och montera det i enlighet med kap. 2.4.2, alltså angripa problemet genom resistiv strömmätning i low-side montering. Detta för att det är en av de enklaste lösningarna utav de beskrivna under teorikapitlet. Det valdes att koppla upp systemet enligt low-side struktur för att undvika att ta hand om höga spänningar vilket också skulle kunna vara en risk för störningar vid mätning. Risken med detta är dock att då det är relativt höga strömmar som ska mätas så kan shuntmotståndet bränna effekt i form av värme vilket kan leda till komplikationer och onödig effektförbrukning. Då spänningsfallet över shuntmotståndet är väldigt lågt så konstruerades en förstärkningskrets med hjälp av operationsförstärkare för att förstärka signalen till lämplig spänning.

För att hålla högspännings systemet och lågspännings mätsystemet galvaniskt separerade så valdes det att använda en optokopplare för att överföra signalen mellan dessa två system genom metoden som beskrivs i kap. 2.5. Då optokopplare fungerar bäst då de har en digital signal att överföra så konstruerades en spännings till frekvenskrets. Denna frekvens kommer vara proportionell emot inspänningen. För att driva mätkretsar på hög-nivå sidan av mätenheten så användes en dc-dc konverter med galvanisk isolering, vilket är en form av ett-till-ett transformator.

Vid ström- och energiberäkning användes en Atmel AVR mikroprocessor med hög klockfrekvens för att kunna omvandla frekvensen från hög-nivå delen till ett strömvärde och sedan beräkna den energi som har förbrukats. När denna beräkning är klar så skickas detta värde ut på CAN-bussen till övriga enheter, dock så simulerades detta med en RS232 signal till dator i prototypen. För att få ett värde på systemets spänning så hämtades det via CAN-bussen från Battery Management

System (BMS), men även detta kommer att simuleras i prototypen med hjälp av ett konstant värde.

Testning och verifiering kommer att ske med hjälp av en känd last i ett känt system. Detta kommer göra att testningen kan ske genom att öka strömmen i systemet och systematiskt verifiera av prototypen läser av samma värde och på så sätt beräknar rätt värde av den förbrukade energin. Det är endast strömmen som kommer mätas då spänningen i ett verkligt system skulle övervakas av BMS:et.

4 Konstruktion

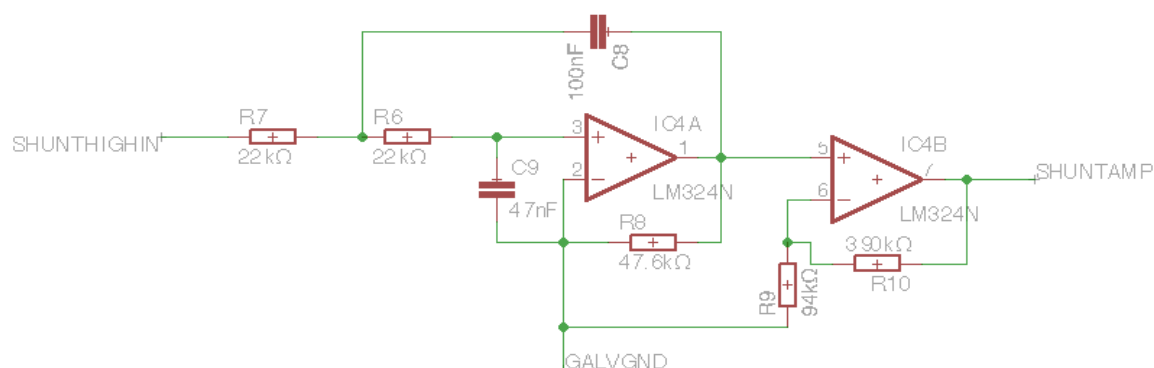
Detta kapitel kommer beskriva den prototyp som konstruerades i projektet för att matcha KTH Racings elbil 2011/2012, R9e. Batteripacks-specifikationerna för denna bil var en spänning på max 420V DC och maximal kontinuerlig ström på 288A. Då prototypen kommer mäta strömmen i bilens högspänningssystem och driva med hjälp av bilens lågspänningssystem så kommer de delar som arbetar med högspänning refereras till som den höga sidan respektive den låga sidan för de delar som drivs och arbetar med spänning från lågspänningssystemet.

4.1 Strömmätning

För att detektera den ström som flöt i systemet användes ett shuntmotstånd med specifikationen 60mV spänningsfall vid 120A. Den valdes för att den beräknade nominella strömmen i systemet var 120A vid ett vanligt varv runt en racingbana. Den beräknas ge ett spänningsfall på 144mV vid max ström.

4.2 Filtrering och signal

Då elbilen drevs med en switchande motorkontroller så ansågs det vara nödvändigt att filtrera bort alla transienter och spikar som uppkommer vid pulsbreddsmodulering för att inte få med störningar i beräkningarna då endast DC signal var intressant. Ett aktivt låg-pass filter av andra ordningen konstruerades för att uppnå en 6dB försvagning av alla signaler över 100Hz. Figur 3.1 visar ett kretsschema för denna konfiguration.



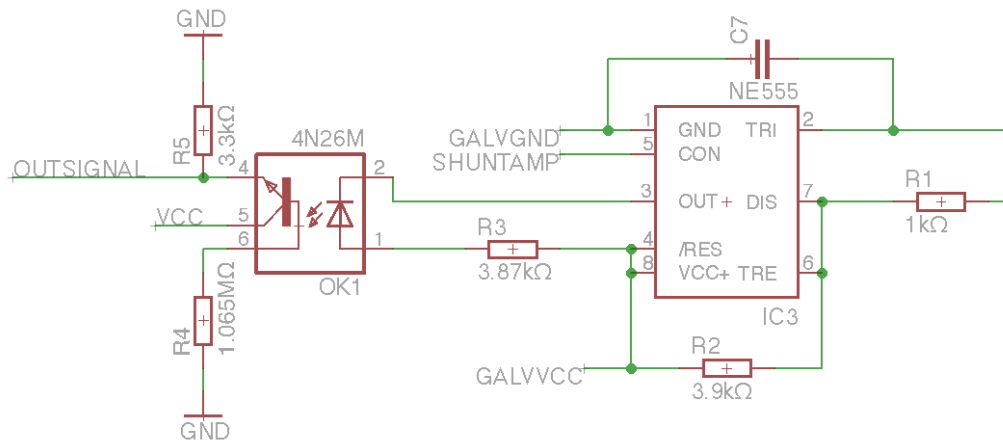
Figur 4.2.1: Andra ordningens låg-pass filter och förstärkning

I figur 4.2.1 så tas signal från den höga sidan av shuntmotståndet in vid ingången SHUNTHIGHIN och jord sidan av shuntmotståndet jordas i den gemensamma joden på den höga sidan namngiven GALVGND. Signalen filtreras och förstärks för att sedan matas ut på utgång SHUNTAMP.

Figur 4.2.1 visar även en förstärkning av signalen då det ansågs vara nödvändigt att förstärka signalen för att spänningar som är enklare att hantera. Signalen förstärktes 40 gånger vilket gjorde att spänningsspannet teoretiskt hamnade mellan 0 och 5.76V.

4.3 Spänning till frekvens och galvanisk isolation

För att överföra signalen från den höga sidan till den låga sidan så var signalen tvungen att överföras galvanisk isolerad. Detta för att minska riskerna för potentialskillnader och kortslutning av högspänningssystemet men även för att följa de regler som är skrivna för formulastudent. Detta problem löstes med hjälp av den klassiska timerkretsen NE555 som kopplades för att generera en frekvens beroende på inspänning. Denna lösning anslöts sedan till en optokopplare för att med ljus överföra signalen till låg-nivå systemet.



Figur 4.3.1: Spänning till frekvens-krets och optokopplare

Figur 4.3.1 visar den uppkopplingen för spänning till frekvens samt den galvaniska separationen av signal. Den förstärkta signalen tas in från operationsförstärkaren i kap 3.2 på pin SHUNTAMP. Spänningen omvandlas till en fyrkantsvåg med hjälp av timerkretsen och skickas vidare till optokopplaren. Optokopplarens utgång, OUTSIGNAL, skickar ut en fyrkantsvåg lik den som kommer in dock galvaniskt isolerad till mikrokontrollern. Med hjälp av resistor R2 så kunde frekvensen trimmas in för att underlätta vid mätning.

4.4 Mikrokontroller

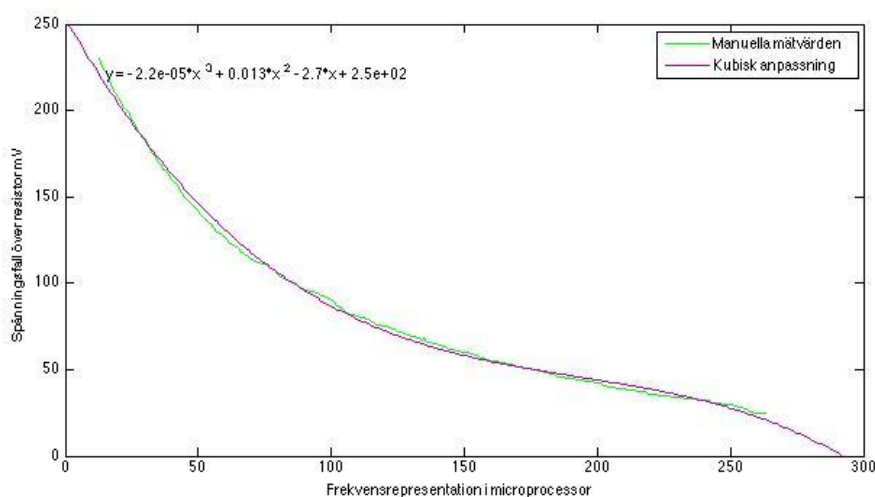
För att beräkna vilken ström som flöt i systemet så användes en mikrokontroller från Atmel, AVR ATmega48. Denna processor kördes i en klockfrekvens på 20MHz för att få mycket beräkningskraft för att kunna ta många mätvärden. Denna processor har ett antal ingångar som triggar extern avbrottshantering och ett antal inbyggda timers vilket var till fördel då frekvensen från spänning till frekvens-kretsen skulle omvandlas tillbaka till ett värde representerande den ström som flöt i systemet. De inbyggda klockorna användes även för att användas som tidsreferens då energin skulle beräknas.

Figur 4.4.1: Överblick över mikrokontroller fysisk konfiguration

Figur 4.4.1 visar hur mikrokontrollern var uppkopplad för att använda dennes maximala kapacitet. Insignal togs in på pinne med namn IN SIGNAL och resultat skickades ut på pin DATACOM1 och DATACOM2.

5 Resultat

Prototypen gav generellt relativt dåliga mätningar. Detta då spänning till frekvens kretsen inte omvandlade spänningen till frekvens linjärt utan till något i stil med en kubisk funktion. Denna krets gav även en för låg frekvens ut vilket gjorde att upplösningen för strömmen vid 20Hz samplingsfrekvens blev 0.5A. Detta var acceptabelt dock hade det varit önskvärt med en högre upplösning och en högre samplingsfrekvens då det hade gett en större noggrannhet.



Figur 5.1 Graf över spänning till frekvens

Figur 5.1 visar kurvan över mappningen mellan frekvensrepresentationen i mikroprocessorn till spänningen. Testerna utfördes med hjälp av en potentiometer som simulerade spänningsfallet över ett shuntmotstånd. Mappningen mellan frekvens och spänning gjordes för hand med hjälp en multimeter, potentiometern ställdes in på en känd spänning, mellan 0-230mV med 5mV steg, och frekvensrepresentationen loggades och plottades sedan i Figur 5.1. En kurvanpassning till mätvärdena gjordes och visade sig sedan ha ett fel på ca 5mV från det verkliga värdet. En kubisk anpassning visade sig matcha det verkliga värdena bäst därför användes den. Denna mappning var dock svår att implementera i mikroprocessorn då processorn har begränsat minnesutrymme, detta skulle dock kunna ha lösts bättre om projektet utökades tidsmässigt. Utifrån figurerna så ser man även att vid höga strömmar,

som genererar ett spänningsfall i 150mV klassen, är väldigt svåra att mäta då kurvan är väldigt vertikal där.

De komponenter som valdes för att uppnå galvanisk isolering gav en isolerings spänning på 1000VDC. I detta fall var det den galvaniska DC-DC omvandlaren som satte begränsningen. Optokopplaren har en isolerings spänning på 7500VDC.

Den fysiska storleken för prototypen vart relativt stor ca 6x10cm.

6 Slutsats

Prototypen visade sig vara en besvikelse då den fick en sämre precision och upplösning än önskat. Detta mest på grund av att spänning till frekvens kretsen inte gjorde om spänningen till frekvens linjärt. Därför utfördes inte fler avancerade tester och utvärderingar. Dock så fanns lösningar för det galvaniska isolationsproblemet vilket var ett orosmoment innan projektet.

Den fysiska storleken blev även mycket större än önskat. Detta skulle dock kunna lösas med att välja ytmonterade komponenter istället för de hålmoterade som användes för prototypen.

6.1 Förbättringar

För att förbättra denna konstruktion skulle en mängd åtgärder kunna utföras. För att behålla det fördelaktiga linjära beteendet som shuntmotståndet tillhandager så skulle istället för en spänning till frekvens krets en analog till digital konverter (ADC) användas. Detta skulle kunna lösas med att denna krets byts ut mot en liten mikrocontroller med inbyggd ADC som endast gör mätningar av spänningsfallet över shuntmotståndet och sedan kommunicerar med en annan mikrocontroller över optokopplare. Detta skulle behålla den galvaniska isoleringen och även höja precision och upplösningen. Det skulle även leda till en mycket enklare elektrisk krets med mindre risk för att införa fel och även ge en mycket mindre fysisk enhet då färre komponenter behövs. Det skulle även gå att använda sig av galvaniskt isolerade CAN-bus transivers direkt vilket skulle leda till att endast en operationsförstärkare, en mikroprocessor, en CAN-bus transiver och en DC-DC omvandlare behövs och samtidigt behålla den galvaniska isoleringen.

Källförteckning

- [1] A. Brandolini, A Gandelli, "Energy Measurement", CRC Press LLC, 1999
- [2] P. Abiodun Bode, "AN39 Current Measurement applications handbok", Sida 4-9, Issue 5, Januari 2008
- [3] Wikipedia "Hall effect". Se http://en.wikipedia.org/wiki/Hall_effect. Senast ändrad 2012-04-12. Hämtad 2012-04-12.
- [4] A Mehta, EETimes "Understand low-side vs. high-side current sensing". Se <http://www.eetimes.com/design/analog-design/4010355/Understand-low-side-vs-high-side-current-sensing>. Publicerad 2009-02-13. Hämtad 2012-04-10.
- [5] Texas Instruments "Traditional High Side Current Sensing". Se <http://www.ti.com/analog/docs/microsite.tsp?sectionId=560&tabId=2182µsiteId=7> . Hämtad 2012-04-10.
- [6] Texas Instruments "Low Side Current Sensing" Se <http://www.ti.com/analog/docs/microsite.tsp?sectionId=560&tabId=2181µsiteId=7> . Hämtad 2012-04-10.
- [7] ISO/IEC 9549: "Galvanic isolation of balanced interchange circuits.", Sida iii, 1990-10-15
- [8] Wikipedia "Optocoupler". Se <http://en.wikipedia.org/wiki/Optocoupler>. Senast ändrad 2012-04-12. Hämtad 2012-04-12.
- [9] Wikipedia "Galvanic isolation". Se http://en.wikipedia.org/wiki/Galvanic_isolation . Senast ändrad 2012-04-12. Hämtad 2012-04-12