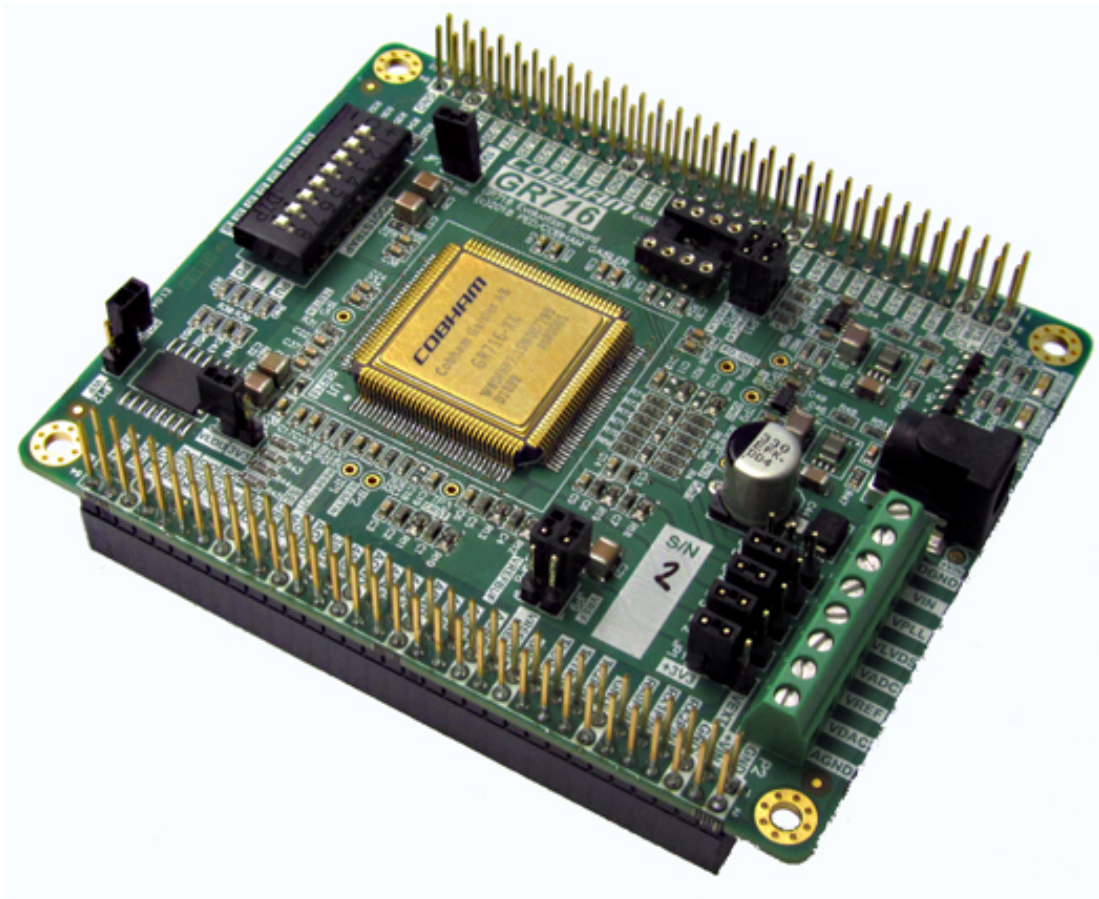




CHALMERS



Styrning av borstlös DC-motor med GR716 mikrokontroller

Examensarbete inom Data och informationsteknik

ADRIAN LUDVIGSSON

EXAMENSARBETE

Styrning av borstlös DC-motor med GR716 mikrokontroller

ADRIAN LUDVIGSSON

Institutionen för Data- och Informationsteknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

GÖTEBORGS UNIVERSITET

Göteborg, Sverige 2019

Styrning av borstlös DC-motor med GR716 mikrokontroller
ADRIAN LUDVIGSSON

© ADRIAN LUDVIGSSON, 2019

Examinator: Jonas Almström Duregård

Institutionen för Data- och Informationsteknik
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Telefon: +46 (0)31-772 1000

The Author grants to Chalmers University of Technology and University of Gothenburg the non-exclusive right to publish the Work electronically and in a non-commercial purpose make it accessible on the Internet. The Author warrants that he/she is the author to the Work, and warrants that the Work does not contain text, pictures or other material that violates copyright law.

The Author shall, when transferring the rights of the Work to a third party (for example a publisher or a company), acknowledge the third party about this agreement. If the Author has signed a copyright agreement with a third party regarding the Work, the Author warrants hereby that he/she has obtained any necessary permission from this third party to let Chalmers University of Technology and University of Gothenburg store the Work electronically and make it accessible on the Internet.

Omslag:
GR716

Institutionen för Data- och Informationsteknik
Göteborg, Sverige 2019

SAMMANFATTNING

Projektets mål är att använda GR716 för styrning av en borstlös likströmsmotor. GR716 är en mikrokontroller utvecklad av Cobham Gaisler AB i Göteborg för att användas inom rymdindustrin.

Motorstyrningen är baserad på positionering med hall-sensorer och utan sensorer genom mätning av BEMF. Resultaten visar ett fungerande program för körning med hall-sensorer. Utöver det visas resultat från mätningar av BEMF med ADC i GR716.

En fungerade motorstyrning utan sensorer uppnåddes inte. Det orsakades delvis av problem med att synkronisera ADC och PWM.

Nyckelord: GR716, BLDC, BEMF, Motor Control

ABSTRACT

The thesis aims to describe strategies to control a brushless dc-motor with the GR716 microcontroller. GR716 has been developed by Cobham Gaisler AB in Gothenburg as a fault-tolerant and radiation hardened general-purpose microcontroller intended for space-applications.

The control is based on position feedback through hall-sensors and BEMF. The results shows a working algorithm for hall-sensor based control. Moreover, the results consists of measurements of BEMF with the ADC in GR716. However, a working sensorless control application was not achieved. It was partly caused by synconization problems between ADC and PWM.

Keywords: GR716, BLDC, BEMF, Motor Control

INNEHÅLL

Sammanfattning	i
Abstract	ii
Innehåll	iii
1 Förkortning och begreppslista	1
2 Inledning	2
2.1 Bakgrund	2
2.2 Frågeställning	2
2.3 Mål	2
2.4 Avgränsningar	2
3 Metod	3
4 Teknisk bakgrund	4
4.1 GR716	4
4.1.1 PWM	4
4.1.2 ADC	4
4.1.3 GPIO	4
4.1.4 I/O Multiplexing	4
4.1.5 Interrupt Controller	4
4.2 BLDC-motor	4
4.2.1 Hall-sensorer	5
4.2.2 Sensorlös styrning	5
4.2.3 BEMF	5
4.2.4 Zero-crossing	6
4.2.5 Integrering	6
4.2.6 Sinusvågformad styrsignal	6
4.3 GR716-test-pwm PCB	6
4.3.1 IRF9Z34 P-MOSFET	6
4.3.2 IRFZ44ZSPBF n-MOSFET	7
4.3.3 MOSFET-drivkrets	7
4.3.4 Överströmsalarm	7
4.3.5 74LVC540 ingångs-buffer	7
4.3.6 LM139A komparator	8
4.4 GR716-dev-board	8

4.5	Mjukvara	9
4.5.1	BCC-kompilator	9
4.5.2	GRMON3 debugger	9
5	Genomförande	10
5.1	Installation av programvara	10
5.2	Uppstart av processor	10
5.3	Verifiering av PCB	11
5.4	Anslutning av motor	11
5.5	Algoritm	11
5.5.1	Kommutering	11
5.5.2	Hastighetsreglering	11
5.5.3	Hall-sensorer	12
5.5.4	Utan sensor	13
6	Resultat	16
6.1	Körning med hall-sensor	16
6.2	Mätning av BEMF	16
7	Slutsats	21
7.1	Svar på frågeställning	21
7.2	Förslag till vidare arbete	21
7.3	Etik	21
	Referenser	21

1 Förkortning och begreppslista

BLDC-motor Borstlös likströmsmotor

Rotor Rörlig del av motor

Stator Stillastående del av motor

Fas Ingång till motorn, benämns U, V och W.

BEMF Back-elektromotorisk kraft

Zero-Cross Tidpunkt då BEMF passerar 0

Kommutering Skifte av ut signaler till motorns faser

PWM Pulsbredd modulering

ADC Analog to digital converter

DAC Digital to analog converter

GPIO General purpose input and output

2 Inledning

2.1 Bakgrund

De senaste åren har stödet för satsningar på rymdfart ökat i Sverige, inte minst genom medlemskapet i Europeiska rymdorganisationen (ESA) [1]. Samtliga av ESA:s medlemsländer ställer sig positiva till att höja anslagen till projekt som stärker europeiska rymdorganisationer samt europeiska företags ställning och konkurrenskraft [1]. Av den konsensus som råder länderna mellan kommer öppna till möjligheter att genomföra fler mängd och mer varierande rymduppdrag i Europa än tidigare. Behovet av infrastruktur och tekniska lösningar anpassade för rymdfart kommer då öka inom den närmsta framtiden.

Cobham Gaisler AB är en ledande aktör inom processorsystem för rymdindustrin. Företaget säljer processorer och utvecklingsverktyg avsedda för kritiska tillämpningar i rymdmiljö. Produktportföljen består av bland annat en mikrocontroller GR716. Mikrocontrollern har utvecklats med avsikten att den ska användas till generella ändamål i rymden.

Detta projekt syftar på att använda GR716 för att implementera motorstyrning på en borstlös likströmsmotor (BLDC-motor). Motorstyrning är en grundläggande funktion i rymd-applikationer och används till att positionera antenner, solceller, och instrument bland annat.

2.2 Frågeställning

- Vilka metoder går att använda för att styra en borstlös dc-motor med GR716?
- Framkommer problem vid mätning av BEMF med GR716?

2.3 Mål

Projektet ska resultera i en framtagen programvara för styrning av en BLDC-motor. Vidare ska tekniker för styrning baserad på back-electromotive force (BEMF) med GR716 ska undersökas. Undersökningen kan leda till identifiering av förslag till förbättringar av GR716 för motorstyrning och verifikation av kravspecifikationer på GR716.

2.4 Avgränsningar

Kretskort till motorn tillhandahålls av företaget. Modifiering och verifiering av denna kommer att krävas men ingen omfattande kretskortsdesign ingår i projektet.

3 Metod

Projektet kommer utföras på Cobham Gaislers kontor där tillgång till hårdvara, mjukvara och manualer finns. Arbetet börjar med att sätta upp miljön, lokalisera ingångar och läsa manualer. Sedan installeras GR716 utvecklingskort på arbetsplatsen, hårdvaru-debugger och kompilator samt koppla upp mot GR716. Ett hello-world program kompileras, laddas till processorn och körs för att verifiera att det fungerar att ladda in program till GR716.

Vidare testas nödvändiga ut- och ingångar på processorn att dem fungerar som förväntat. Detta görs genom att skriva enkelt program som genererar en puls på processorns PWM, DAC och ADC ut- och ingångar samtidigt som de kontrolleras mot ett oscilloskop. Då det inte finns något färdigt bibliotek för PWM, ADC och DAC måste funktioner för dessa implementeras med information från GR716 datablad. Funktionerna testas så att de starta och konfigurera PWM-enheterna samt att PWM-signaler genereras korrekt på GR716 utgångar. Test utförs också på funktioner för ADC mätning, för att verifiera att funktionerna fungerar och kan mäta spänningen på GR716:s ingångar.

Nästa steg är att undersöka hur motorn ska kopplas in till PWM, DAC och ADC i processorn, detta kräver pin multiplexing och information om vilka funktioner de olika benen på processorn har. Information om detta hämtas från manualer och datablad.

Företaget tillhandahåller ett färdigt PCB som kopplas mellan processorn och motorn. Kretsschemat till denna undersöks för att förstå hur integrationen mellan denna och processorn ska fungera. Lämpligen tas sanningstabeller mellan ingångarna på PCB:t och utgångarna till motorns faser fram.

När motorn, PCB och processorn är ihopkopplade och testade undersöks och specificeras en lämplig kontroll algoritm som passar motorn och vilka delar den kan delas upp i. Algoritmen diskuteras och bestäms med handledare från Cobham Gaisler, och sedan implementeras den byggblock för byggblock.

Efterhand som algoritmens delar blir klara kontrolleras och testas dem mot ett oscilloskop för att säkerställa funktionen hos dem.

4 Teknisk bakgrund

I detta avsnitt beskrivs styrning av borstlösa motorer, ett urval av för- och nackdelar vid en handfull metoder och tekniker. Kunskap om BLDC-motorn och principerna som ligger bakom styrningen är nödvändig för utformningen av applikationen. Begränsningar och förutsättningar i den aktuella hårdvaran behöver även respekteras och präglade val av metod, strategi och beslut som är lämpliga för de egenskaper i motorstyrningen som ska uppnås.

Vidare kommer GR716 behandlas och vilken funktionalitet som finns tillgängligt gällande periferienheter etc. Då ett delsyfte med rapporten är att föreslå förbättringar till kommande versioner av GR716 kommer även metoder som det inte finns möjlighet att använda sig av dagens version av mikrokontrollern tas upp kortfattat.

4.1 GR716

GR716 är en mikrokontroller för applikationer i rymdmiljö. På grund av förekomsten av kosmisk strålning i rymden är mikrokontrollern skyddad mot detta. Även i andra kritiska system som utsätts för strålning kan GR716 användas, exempelvis inom kärnkraft och medicinsk utrustning som strålbehandling- och röntgenmaskiner. Då en mängd periferienheter och kommunikationsgränssnitt stöds är GR716 lämplig för olika ändamål. Det finns 64 utgångar som kan konfigureras med olika funktioner som finns inbyggt i processorn [2].

4.1.1 PWM

GR716 har två PWM-generatorer. Vardera generator har totalt 8 kanaler varav 4 inverserade kanaler.

4.1.2 ADC

GR716 har en inbyggd ADC-enhet (analog to digital converter). ADC-enheten har en separat multiplexer som ger möjlighet att läsa från 8 olika ingångar.

4.1.3 GPIO

GPIO kan användas för läsa digitala ingångar till GR716. Avbrott kan konfigureras hög eller låg nivå samt stigande eller fallande flank.

4.1.4 I/O Multiplexing

I/O-multiplexing används för att konfigurera in- och utgångar till olika periferienheter i GR716.

4.1.5 Interrupt Controller

Interrupt Controller i GR716 hanterar avbrott genererade av periferienheter. Tidstämplar vid generering och hantering kan läsas från register i enheten. Differensen mellan tidstämplar kan användas för att mäta tiden innan avbrottet hanteras av processorn.

4.2 BLDC-motor

Användningen av borstlösa likströmsmotorer (BLDC-motor) har ökat de senaste decennierna.[3] BLDC-motorer har bättre prestanda gällande strömförbrukning, effekt och vibrationer jämfört med konventionella motorer.

BLDC-motorer saknar borstar som leder ström till motorns spolar. Friktionen som uppstår där borsten ligger an mot motorns roterade spolar orsakar försämrade egenskaper hos motorer med borst.

Användningsområden där BLDC-motorer förekommer är där krav på hög effekt per viktenhet, lågt underhåll, låg ljudnivå samt låg energiförbrukning ställs. Optimering av egenskaper kan göras med olika metoder vid styrning av motorn. Vilka egenskaper som är önskvärda är beroende på användningsområdet. Exempelvis kan lägre vibrationsnivåer leda till minskade underhålls-behov vid inbyggnad i industriella applikationer.

BLDC-motorer kräver mer avancerad styrning än traditionella likströms motorer med borst, dessutom är prestandan beroende på implementationen av styrningen och hårdvaran som används. Rotorns position i förhållande till statorn avgörs elektroniskt för att det ska vara möjligt att elektrifiera fasen som kan producera mest vridmoment vid den positionen. Det finns flera metoder för att detektera positionen av rotorn, däribland metoder som baseras på sensorer monterade på motorn och metoder som utnyttjar BEMF (back-elektromotorisk kraft) uppstår genom induktion när magneterna rör sig över motorns elektromagnetiska spolar [3].

4.2.1 Hall-sensorer

Hallsensorer är en vanligt förekommande typ av sensorer för positionsdetektering av rotorn på BLDC-motorer. Det finns tre stycken givare vilket ger en kodning med digitala bitar som kan läsas av styrenheten. Kombinationen av signalen från de tre hallsensorerna korresponderar till en fas i den elektriska cykeln vilket underlättar implementering av styrningen jämfört med styrning utan sensorer, där BEMF passerar noll mitt i ett steg. Därmed krävs ingen användning av timers från signalen från sensorerna ändras tills dess utsignaler till faserna ska skiftas vid användning av hall-sensorer.

4.2.2 Sensorlös styrning

För att eliminera användningen av hall-sensorer avgörs positionen genom mätning av BEMF i motorn. Att styrning utan sensorer förekommer ofta beror delvis på att det är prissmässigt fördelaktigt och även att det går att få bättre prestanda än med sensorer då algoritmen kan ta hänsyn till fler parametrar än när digitala signaler från hall-sensorer används [3]. Utifrån mätvärdena går det att avgöra vilken position rotorn har i förhållande till statorn då BEMF uppstår i motorn beronde på vinkeln mellan rotorns magnetfält och faserna. Olika tekniker kan användas beroende på funktionaliteten som finns tillgänglig i hårdvaran som används till mätningen.

4.2.3 BEMF

BEMF används för att avgöra positionen utan sensorer. Spänningen uppstår genom en spänning induceras i spolarna när permanentmagneterna rör sig över spolarna i motorn. BEMF är linjärt beroende på motorns varvtal, därmed blir denna metoden olämplig vid låga varvtal då motorn inte producerar tillräckligt stark BEMF för att mätas. När motorn är stillastående uppstår ingen BEMF, vilket kräver att motorn startar utan att positionen är känd.

BEMF spänningen kan inte extraherats direkt från den flytande fasen samtidigt som de övriga faserna drivs med en ström [3]. BEMF kan mätas direkt under den inaktiva delen av PWM-perioden. Alternativt kan BEMF extraheras under den aktiva delen av PWM genom att subtrahera halva matningspänningen från spänningen i den flytande fasen.

Fördelar med att mäta när PWM är aktiv är att mätvärdena blir mindre känsligt för störningar och att det går att köra motorn med 100 % PWM duty cycle. Nackdel med mätningen av BEMF vid PWM aktiv är att det krävs kompensering av spänningsfall över MOSFET-transistorer samt dioder mellan strömkällan och motorns faser.

4.2.4 Zero-crossing

En av de enklaste metoderna för styrning baserat på BEMF benämns zero-cross method [3]. Metoden går ut på att mäta när BEMF-spänningen passerar noll i den flytande fasen. Zero-crossing inträffar när permanentmagnetens poler ligger i samma riktning som ett spolar-par i motorn och då induceras ingen spänning i spolarna. Vid detta tillfälle passerar BEMF-spänningen noll och genom att starta en timer som löser ut efter vad som motvarar 30 grader kan kommutering ske vid ideal tidpunkt. Om hastigheten på rotorn förändras för snabbt hamnar motorn ur fas och stannar. Detta begränsar användningsområden där motorn körs i höga hastigheter och samtidigt utsätts för stora variationer i hastighetsändring då detta riskerar att få motorn att hamna ur fas.

4.2.5 Integrering

I och med att BEMF spänningen är linjär med avseende på motorhastigheten kan en integrator användas istället för timer. Detta leder till minskad påverkan av störningar och enklare konfiguration.

4.2.6 Sinusvågformad styrsignal

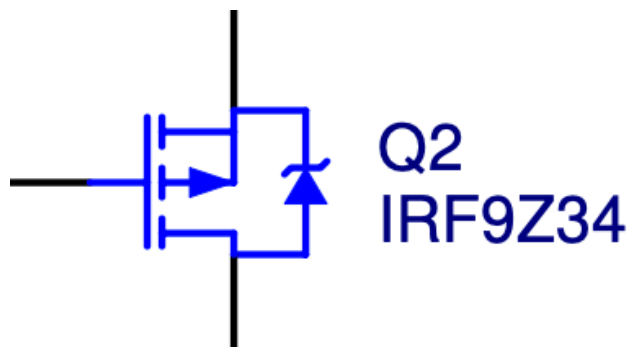
För att minska störningar i vridmoment kan sinusformade styrsignaler användas. Vridmomentet som en fas producerar är beroende på vinkeln mellan fasernas magnetfält och permanentmagnetens riktning. För att producera en jämn nivå av kan en sinussignal avseende på vinkeln mellan magnetfälten användas för att ge en högre utsignal vid en mindre vinkel och en lägre utsignal när vinkeln är högre.

4.3 GR716-test-pwm PCB

GR716-test-pwm är ett kretskort som används till att driva en 3-fas motor med PWM med GR716. Den består av en 3-fas inverterare för att styra utsignaler (faser) till motorn. Det finns 6 ingångar för PWM-sigaler, en för varje transistor på PCB:t. Varje utgång till motorn styrs av två transistorer, en p-MOSFET för matningsspänningen och en n-MOSFET för jord. Alla tre faser har två MOSFET-transistorer.

4.3.1 IRF9Z34 P-MOSFET

p-MOSFET transistorerna öppnar och stänger matningsspänningen till de tre faserna (U, V och W). På transistorerna finns tre kontakter med bennämningarna source, drain, samt gate. Potentialen mellan source och gate avgör om transistorn är stängd (ledande) eller öppen (ej ledande). IRF9Z34 är normalt stängd vilket betyder att om ingen potential finns mellan source och drain kommer transistorn vara stängd.



Figur 4.1: IRF9Z34 p-MOSFET, med kontakten gate till vänster, source upptill samt drain nertill

4.3.2 IRFZ44ZSPBF n-MOSFET

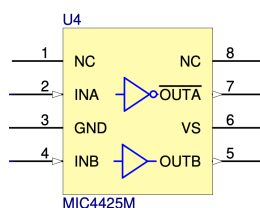
IRFZ44ZSPBF n-MOSFET öppnar och stänger jord till de tre faserna (U, V och W), liknande p-MOSFET transistor. Med det finns även skillnader då arkitekturen på elektroniken ser annorlunda ut. Tidskonstanterna för öppning och stängning av transistorn är lägre hos n-MOSFET än p-MOSFET.



Figur 4.2: IRFZ44ZSPBF n-MOSFET, med kontakten gate till vänster, source nertill samt drain upp till.

4.3.3 MOSFET-drivkrets

MIC4425M är en drivkrets för MOSFET-transistorer och förstärker GR716 3.3 volt-utgång till 12 volt som används till MOSFET-transistorerna. Drivkretsen har två utgångar varav en är inverserad och styr p-MOSFET transistorn, den icke-inverterade utgången styr n-MOSFET. I och med att potentialen på gate:en hos p-MOSFET är lika med matningsspänningen måste även source drivas med matningsspänningen för att gate-source potentialen ska vara noll. Source på n-MOSFET är jord vilket leder till att n-MOSFET styrs med en icke-inverserad utgång.



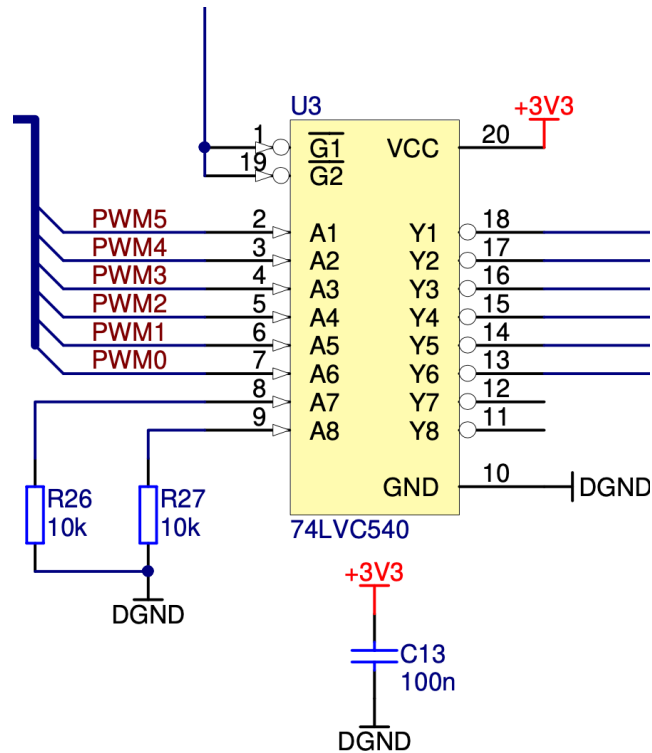
Figur 4.3: MIC4425M. Drivkrets till n-MOSFET och p-MOSFET. Utgången OUTA är inverserad och går till P-MOSFET. Utgången OUTB är ej inverserad och går till n-MOSFET

4.3.4 Överströmsalarm

Kretskortet har ett överströmsalarm som stänger av ingångarna via en ingångsbuffer. Gränsvärdet på alarmer styrs via mjukvaran i GR716. Det finns även möjlighet att använda en potentiometer, vilket kan vara till fördel vid programutveckling då behov att ställa in alarmer utan att programmera funktionen i GR716 finns.

4.3.5 74LVC540 ingångs-buffer

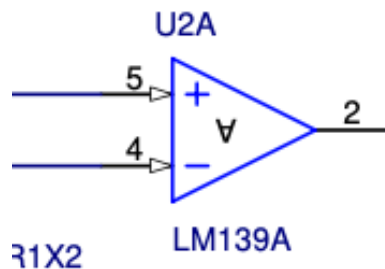
74LVC540 är ingångsbuffer i PCB:t som aktiverar PWM-ingångarna till 3-fas inverteraren. ingångsbuffern stänger av ingångar om överströmsalarmet är aktivt. Utgångarna är inverserade enligt figur 4.4.



Figur 4.4: 74LVC540 ingångsbuffer. G1 och G2 aktiverar input buffern, på ingångarna A1 till A6 kommer PWM signaler från mikrokontrollern. Utgångarna Y1 till Y6 leder till MOSFET-drivkretsarna.

4.3.6 LM139A komparator

LM139A är en komparator som på GR716 TEST PWM PCB:t styr över strömalarmet. Utgången i figur 4.5 går till ingångsbuffern. Ingång 5 är strömförbrukningen i motorn s. Ingång 4 som ställer gränsvärdet för överström alarmeret via GR716 DAC alternativt en potentiometer.



Figur 4.5: LMA139A. Ingång 4 ställer gränsvärde till överströmslarmet.

4.4 GR716-dev-board

GR716 placeras i ett utvecklingskort benämnt GR716-dev-board som underlättar anslutning av GR716 som underlättar anslutning av ut- och ingångar till GR716.

4.5 Mjukvara

4.5.1 BCC-kompilator

BCC (LEON Bare-C Cross Compilation System) är en kompilator för att kompilera program till GR716 och andra LEON processorer utvecklade av Cobham Gaisler AB.

4.5.2 GRMON3 debugger

GRMON3 är en hådvaru-debugger utvecklad av Cobham Gaisler AB för att användas vid mjukvaruutveckling med deras processorer. GRMON3 används till att ladda in binärfiler till processorn, köra filerna samt läsa/skriva till register och globala variabler. Det går att skriva script som körs före start och efter stop av program på processorn.

5 Genomförande

I detta avsnitt beskrivs arbetet som utfördes för att implementera motorstyrningen på GR716. Utveckling av drivrutiner för de periferienheter som används av programmet, exempelvis PWM och ADC, krävdes då detta inte fanns färdiga tillgängligt. I källkoden har filerna som används filerna för drivrutiner och filerna som innehåller koden för motorstyrning delats upp och ligger i separata kataloger.

5.1 Installation av programvara

För att påbörja utvecklingen av programvara till GR716 installeras kompilator, simulator och hårdvarudebugger. Först installeras kompilatorn. I och med att arbetstationens operativsystem är linux behöver sökvägen till kompilatorn exporteras till miljövariabeln PATH i operativsystemet. Detta görs i terminalen med kommandot:

```
$ export PATH=/opt/bcc-2.0.8-rc.3-gdb8-gcc/bin:$PATH
```

I kompilatorns katalog finns det en en samling med exempelprogram under /src/examples samt en Makefile som används för att bygga programmen. Kommandot för att göra det är endast:

```
$ make
```

Då kompileras programmen för alla tillgängliga versioner av LEON3-processorn. För att bygga för specifika plattformar kan det anges i en kompilatorflagga, kommandot för att bygga till GR716 blir då:

```
$ make BSPS="GR716"
```

De körbara binärfilerna sparas i en dold katalog på samma sökväg (namnet på katalogen börjar med .). Om programmen kompileras utan felmeddelanden är kompilatorn installerad. För att ladda över programmen till processorn används hårdvarudebuggern GRMON3, vilken kräver en USB-licensnyckel för att använda. Det finns en utvärderingsversion av GRMON3 att ladda ner från Cobham Gasilers hemsida. Men då processorn sitter på ett utvecklingskort måste den fullständiga versionen av GRMON3 användas. Denna installeras av handledare på företaget via SSH.

När GRMON är installerat och processorn är inkopplad via USB går det att starta GRMON. För att göra det behöver den USB-port som används specificeras. USB enheter kan listas i terminalen och om processorn är inkopplad borde det se ut som följande:

```
$ ls /dev/ttyUSB*  
/dev/ttyUSB0 /dev/ttyUSB1 /dev/ttyUSB2 /dev/ttyUSB3
```

Som standard initierar GRMON debugglänken på usb-porten med lägst nummer. I det här fallet är det /dev/ttyUSB0, men det kan också vara ett annat nummer om den är upptagen. Detta anges som argument för att starta GRMON:

```
$ /grmon-pro-3.1.0/linux/bin64/grmon -uart /dev/ttyUSB0 -u -cginit 0x10000
```

Sökvägen till USB-porten anges i argumentet -uart. För att dirigera stdout från processorn till GRMON anges även argumenten -u och -cginit 0x10000, detta krävs för att se vad som skrivs från processorn med printf och andra funktioner som använder stdout. Om GRMON lyckas ansluta till processorn är den också korrekt installerad.

5.2 Uppstart av processor

I GRMON laddas ett program över till processorn genom:

```
grmon3> load <sökväg till binärfil>
```

5.3 Verifiering av PCB

PCBs ansluts till GR716:s ingångar som är specificerade i PCB:ts kerts kortschema. Testning PCB:t sker genom att mäta ut signaler MOFSET-transistorerna vid de tillåtna insignalerna.

5.4 Anslutning av motor

Motorns ansluts till PCB:t genom utgångarna (U, V, W). Hallsensorerna (A,B,C) samt V+ och GND ansluts också till PCB:t.

5.5 Algoritm

Styrningen baseras på sex-stegskommutering. Ett elektriskt varv delas in i sex faser. Utsignalerna för varje fas beskrivs i tabell 5.1. För att avgöra vilken fas motorn befinner sig i kan flera metoder användas. I detta projekt kommer styrning med hall-sensorer och med BEMF behandlas. Hall-sensorerna kommer att utnyttjas för att starta motorn vid styrning utan sensorer. Styrning utan sensorer kräver en separat startstrategi då BEMF inte kan mätas när motorn är stillastående, vilket gör starten av motorn mer komplicerad.

5.5.1 Kommutering

Ett elektriskt varv består av sex faser och det leder till sex olika kombinationer av ut signaler till motorns terminaler. Under en fas är en terminal till motorn hög, en jord och en flytande. Detta ger ut signaler enligt tabell 5.1.

	Hall-sensor			Fas		
	A	B	C	U	V	W
1	1	0	1	hög	låg	flytande
2	1	0	0	hög	flytande	låg
3	1	1	0	flytande	hög	låg
4	0	1	0	låg	hög	flytande
5	0	1	1	låg	flytande	hög
6	0	0	1	flytande	låg	hög

Tabell 5.1: Samband mellan insignaler från hall-sensorerna och ut signaler till faserna för medurs rotation av BLDC-motorn.

För att kommutera motorn ändrar programmet PWM ut signalerna till nästkommande steg enligt tabell 5.1. Vid körning utan hall-sensorer avgörs kommuteringstiden genom att mäta BEMF-signal från den flytande fasen istället.

5.5.2 Hastighetsreglering

Hastigheten regleras genom pulsbreddsmodulering (PWM). PWM periodtid väljs till ett lämpligt värde genom att ta hänsyn till ADC-enhetens tid för att ta ett mätvärde. För att ADC:n ska ge ett användbart mätvärde måste spänningen vara stabil i ungefär $20\mu s$ [2]. BEMF spänningen mäts under den låga eller höga delen av PWM perioden. Tiden PWM är stabil måste vara större än tiden för ADC att ta ett mätvärde. Periodtidens behöver även vara betydligt kortare än ett steg vid motorns nominella hastighet för att regelera spänningen till motorn.

Lämpligt värde på PWM-periodtiden beräknas då motorns nominella hastighet är 4000 varv/min, 4 elektriska varv per mekaniskt varv och ett elektriskt varv består av 6 steg.

$$t_{fas} = \frac{60}{4000 * 4 * 6}$$

$$t_{fas} = 625\mu s$$

Med en undre gräns för ADC-mätning:

$$t_{pwm} > 20\mu s$$

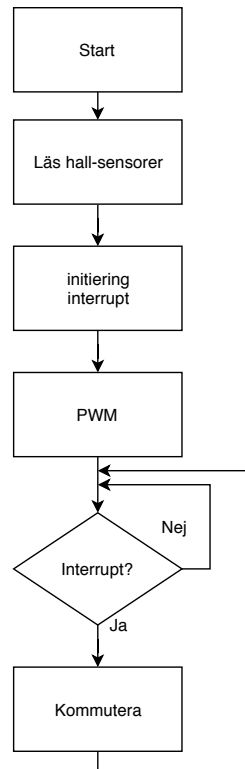
Blir högsta möjliga duty cycle vid ADC-mätning:

$$duty\ cycle = 1 - \frac{20\mu s}{625\mu s} = 96.8\%$$

5.5.3 Hall-sensorer

Vid styrning med sensorer kommuteras motorn när någon av hall-sensorerna skiftar nivå. Vid start av motorn läses nivån in från hall-hallsensorerna. Beroende på vilka värden som lästes in så aktiveras avbrott vid flank för att utlösas när signalen från en sensor skiftar nivå. Utgångar lämpliga för den aktuella positionen aktiveras för att motorn ska drivas. Processen är händelsedriven, avbrott är konfigurerat att genereras vid en positiv eller negativ flank på någon av ingångarna från hall-sensorerna. Följande punkter behöver implementeras i programmet för att köra motorn.

- Läs ingångar från hallsensorer och aktivera avbrott.
- Starta pwm-utgångarna.
- Avbrottsshantering.
- Kommutering av motorn.



Figur 5.1: styring av motorn med hall-sensor. Ingångarna från hall-sensorerna läses in vid en positiv eller negativ flank på signalen.

Hastighetsreglering visas inte i figur 5.1 då det sker separat som inte är beroende på vilken metod för detektering av positionen som används.

För att läsa ingångarna från hall-sensorerna används GR716:s GPIO. För att initialisera programmet läses hallsensorerna in med GPIO. Efter det kan GPIO konfigureras med avbrott. GR716:s GPIO kan generera avbrott vid antingen stigande eller fallande flank men inte båda samtidigt. Avbrott konfigureras att ske vid fallande flank om ingången är hög och stigande om ingången är låg.

Motorn startar genom att aktivera PWM utgångarna till motorn med avseende på 5.1. Hastigheten regleras genom PWM signalens duty cycle.

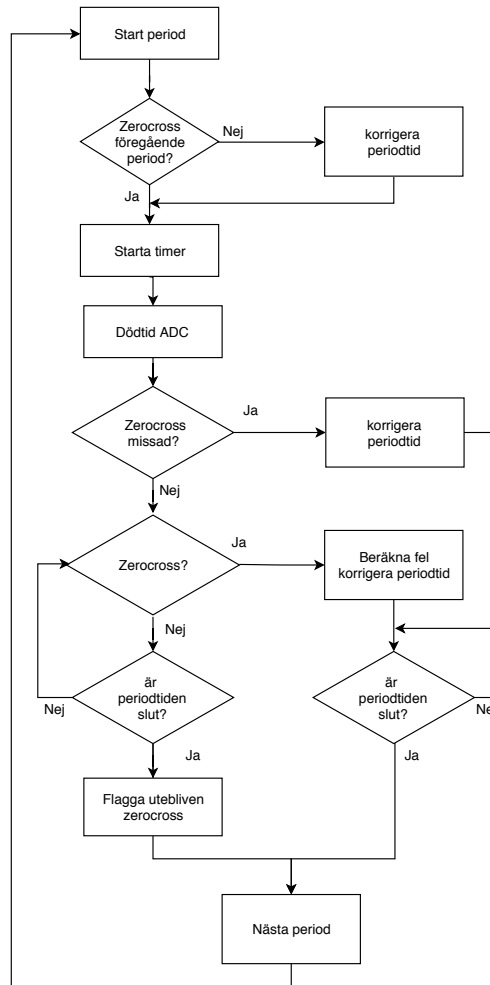
Avbrottrutinen programmeras att skifta avbrott vid stigande och fallande flank på den ingång som orsakade avbrottet. Detta görs genom ett register i GPIO. Avbrottsrutinen behöver då inte läsa ingångarna från hall-sensorerna, utan använder istället en global variabel som representerar vilket steg motorn befinner sig i.

5.5.4 Utan sensor

För att styra motorn utan hall-sensorer krävs en annan metod för att avgöra positionen på rotorn. Genom mätning av BEMF i motorns flytande fas går att bestämma rotorns position. Metoden baserar sig på att permanentmagneten i rotorns magnetfält har samma riktning som den flytande fasens spolar när BEMF i den flytande fasen passerar noll.

Motorn producerar inte någon BEMF när motorn är stillastående. För att starta motorn behöver man göra det utan att rotorns position är känd. På grund av detta utförs försök att mäta BEMF under tiden motorn körs med hall-sensorerna.

Algoritmen för styrningen utformas enligt flödeschemat i figur 5.2. Endast körning hanteras av algoritmen uppstart av motorn kräver en separat startstrategi i och med att det inte är möjligt att mäta BEMF i låga hastigheter. Styrning av varvtalet styrs genom PWM separerat och visas inte i figur 5.2.



Figur 5.2: flödesschema för styrning baserat på BEMF zero-crossing

En period startar vid en kommutering av motorn. Periodtiden förutses genom att använda ett rullande medelvärde av tidigare uppmättna perioder,

Om inget zero-cross detekterades under föregående period kommer periodtiden korrigeras vid periodens början. I och med att medelvärdet på periodtiden inte uppdaterades under föregående period behöver den beräknas om vid start. Timer startas för att utlösas när periodtiden är slut. ADC startar att mäta spänningen på den flytande fasen på motorn för att interupt ska ske vid zero-cross, alltså när spänningen på terminalen passerar halva matningsspänningen. För att inte störningar ska påverka och utlösa ADC:n behövs en dödtid innan den aktiveras. Denna bör beräknas som en funktion av periodtiden då det tillåter snabbare hastighetsförändringar.

När ADC:ns dödtid är slut kontrollerar algoritmen om spänningen redan har passerat halva matningsspänningen. Då beräknas en ny periodtid och timern uppdateras med hälften av den nya periodtiden.

Vid konstant hastighet sker zero-cross efter halva periodtiden. Vid ökning av varvtalet kommer zero-cross inträffa tidigare än halva periodtiden och vid minskning inträffar det senare. Om zero-cross sker för tidigt eller sent betyder det att hastigheten på motorn har förändrats för snabbt. Om en hastighetsregulator används behövs börvärdesrampning som tar hänsyn till tiden zero-cross inträffar för att förhindra motorn att hamna ur fas genom att zero-cross antingen inträffar före ADC dödtid har löpt ut eller att periodtiden löper ut före zero-cross inträffar.

Om zero-cross detektering lyckas beräknas en ny periodtid som används istället. I fall ingen zero-cross detekteras under perioden kommer motorn kommutera när timern löser ut och korrigering på grund av den missade zero-cross beräknas efter det.

När ett zero cross har detekteras beräknas perioden mellan den och den föregående zero-cross:

$$\begin{aligned}\Delta T_{ZC}[n] &= T_{ZC}[n] - T_{ZC}[n - 1] \\ \Delta T_{ZCMedel} &= \frac{1}{2}\Delta T_{ZC}[n] + \frac{1}{2}\Delta T_{ZC}[n - 1]\end{aligned}$$

Tidpunkten då nästa kommutering ska inträffa:

$$T_{kom} = T_{ZC}[n] + \frac{1}{2}\Delta T_{ZCMedel}$$

6 Resultat

Resultat från mätningar vid körning av motorn presenteras i denna del. Mätningarna inkluderar plottning av varvtal per minut (RPM) och sampling av BEMF-signaler. Vid körning i konstant hastighet av motorn utan belastning, vidare presenteras resultat från mätningar av BEMF-signalerna från motorns faser vid körning med sensorer. Mätningarna utfördes med GR716:s ADC vid körning av motorn med sensorer. Dessa jämförs med förenklade figurer av oscilloskop-mätningar som gjordes för att bedöma resultaten från samplingarna som gjordes med GR716.

Mätningen av BEMF-signaler med GR716:s ADC var delvis misslyckat. En del av samplingarna visade förväntat resultat men samtidigt förekom mätvärden som inte förväntades eller var felaktiga.

Då sensorlös styrning av motorn bygger på BEMF signaler och mätningarna av BEMF-signalerna med GR716:s ADC var misslyckades delvis var inte det möjligt att köra motorn utan sensorer. Därmed presenteras inga resultat från körning av motorn utan sensorer då mätningen av BEMF signalen med GR716 misslyckades.

6.1 Körning med hall-sensor

Motorns varvtal vid körning med sensorer plottas vid max spänningstillförsel (PWM 100% duty cycle) och ingen yttre belastning.

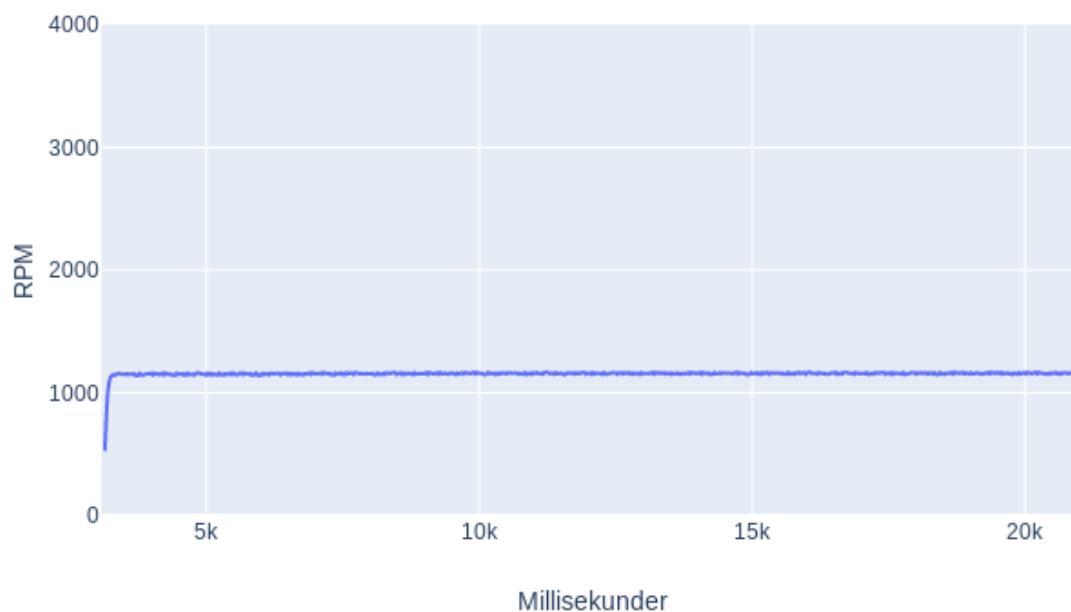
Hastigheten uppmättes genom att läsa en tidstämpel från ett register GR716:s interrupt controller vid varje varv. Sedan beräknas hastigheten genom att dividera differensen av två efterföljande tidstämplat med GR716:s klockfrekvens. Denna metod användes för att ingen annan utrustning för att mäta hastigheten fanns tillgänglig.

Motorns hastighet uppgår till ca 1200 RPM. Matningsspänningen är 12 volt då PCB är dimensjonerad för att driva en 12-voltsmotor. Att tilläga till detta är att motorn som används i projektet är en 24-voltsmotor och har en nominell hastighet på 4000 RPM.

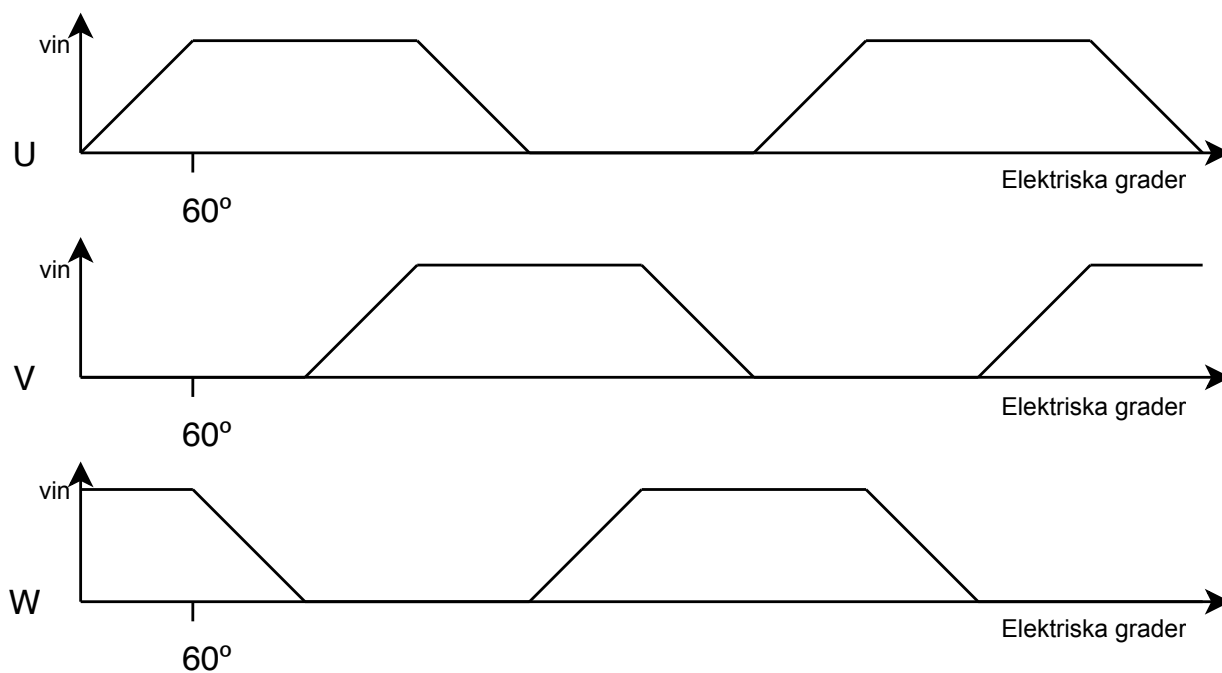
6.2 Mätning av BEMF

BEMF-signalen utvinns genom att mäta spänningen på faserna U, V, och W samtidigt som motorn kör. Figur 6.2 visar en förenklad bild av spänningen på faserna under 1,5 elektriskt varv (540 elektriska grader) som ursprungligen uppmättes med oscilloskop. Spänningen på motorns faser vid körning är en periodisk signal. Faserna U, V, W är förskjutna 120 grader från varandra, vilket motsvarar två kommuteringssteg, se tabell 5.1. Mätvärden tas med GR716:s ADC vid en tidpunkt när PWM är aktiv. Vid 100% duty cycle är spänningen kontinuerlig, när PWM appliceras går spänningen i den flytande fasen från hög till låg i samband med att matningsspänningen skiftar till och från.

BLDC-motor

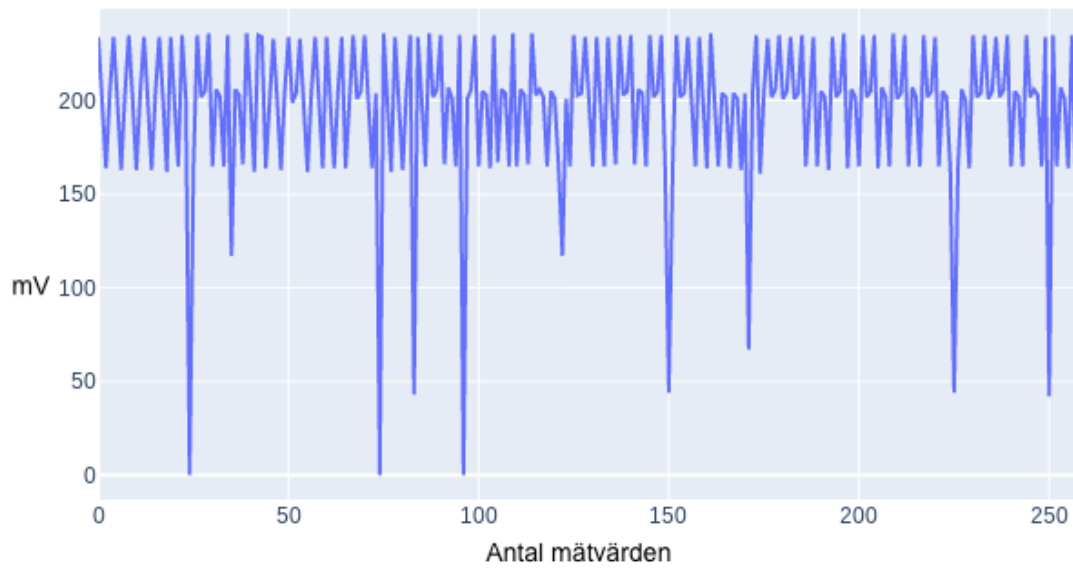


Figur 6.1: Körning av motorn med hall-sensorer i konstant hastighet utan yttre belastning och PWM med 100 % duty cycle.



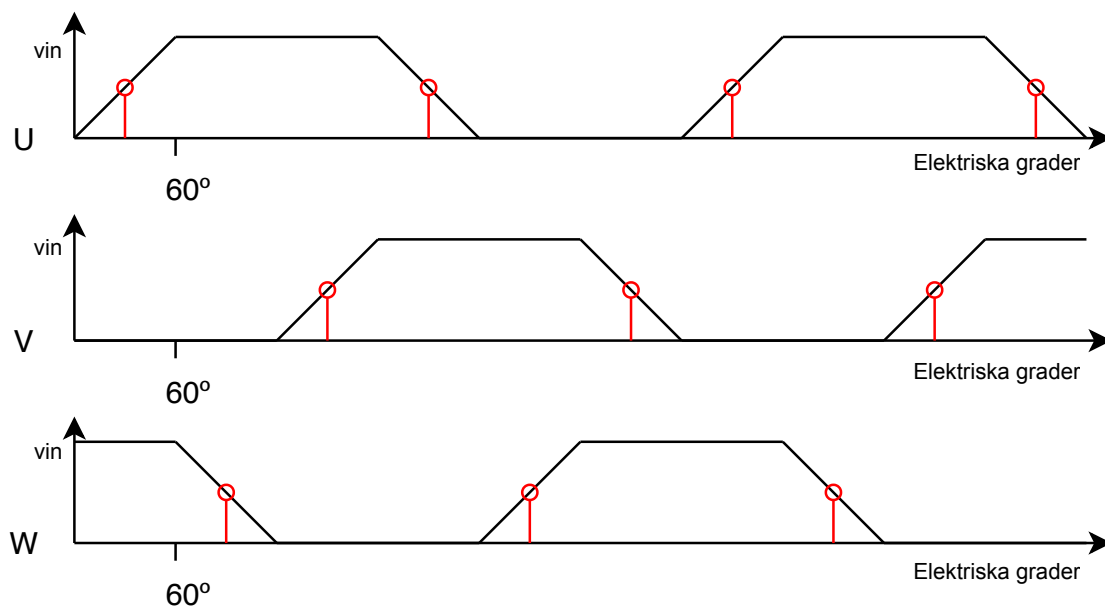
Figur 6.2: Illustration av spänning på faserna U, V, W under 1,5 elektriskt varv vid 100% PWM. 60 elektriska grader motsvarar ett steg i 6-stegskommutering, se figur 5.1 sida 11. Ursprungligen uppmätt med oscilloskop.

GR716 ADC kan mäta spänningar mellan 0 och 2.5 volt. Spänningen från faserna skalas ner på PCB från 0-12 V till 0-1.5 V som ADC:n kan mäta. I figur 6.3 visas resultatet från mätningar av BEMF med ADC på y-axeln och antal mätvärden på x-axeln.

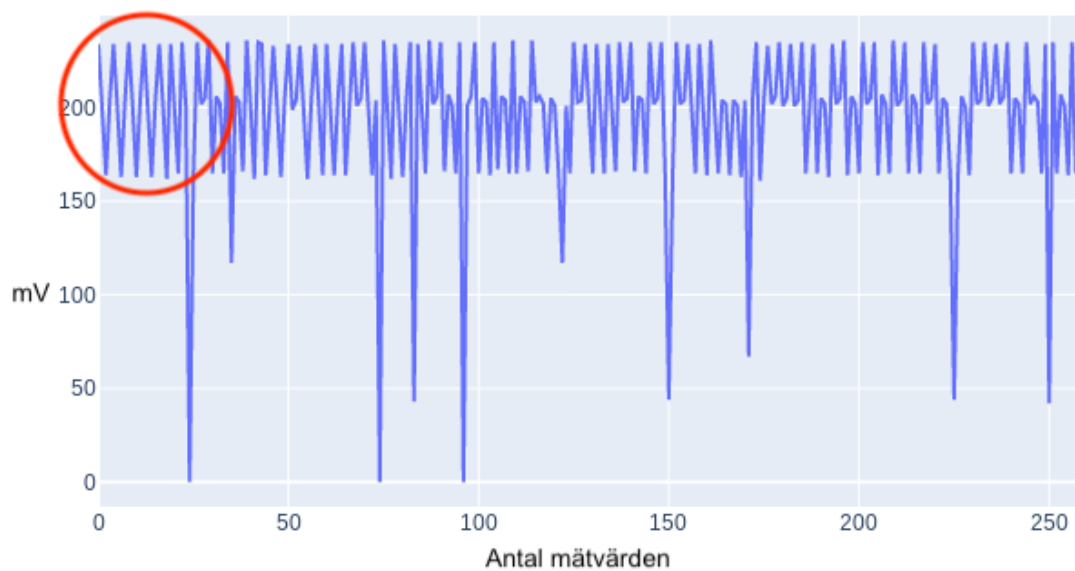


Figur 6.3: Mätvärden BEMF på de flytande faserna vid körning med sensorer

Mätvärden togs på fasen som är flytande, dvs den fas som är stigande eller fallande. I figur 6.4 visas de punkter på fasernas spännings-graf som samplingen var ämnade att ske på.



Figur 6.4: Mätvärden av fasernas spänning för att utvinna BEMF signalen med GR716. Röd markering visar var mätvärden togs.



Figur 6.5: Den röda markeringen visar mätvärden som har ett förväntat resultat.

I det markerade området på figur 6.5 vid start är resultatet som förväntat. Då var annat prov tas när den flytande fasen är stigande respektive fallande. Mätningarna visar även icke-förväntade värden, dvs dem som är eller i närheten av 0. Det är inte möjligt att köra motorn utan sensorer när inte mätvärdena är korrekta då detta leder till att en korrekta tider för kommutering inte kan beräknas, vilket leder till att motorn inte kan köras utan sensorer.

7 Slutsats

Motorstyrning med hall-sensorer lyckades, vilket visas i figur 6.1, men styrning utan sensorer uppnåddes inte. Mätning av BEMF med processorn inbyggda ADC krävde att synkronisering med PWM för att det skulle var möjligt att använda till att styra motorn.

Resultaten från mätningarna tyder på att synkroniseringen mellan PWM och ADC orsakar fel. I motorstyrningen konfigureras ADC:n att generera avbrott när ett gränsvärde nås. På grund av det är det inte alltid möjligt att filtrera mätvärden i mjukvara, ADC-enheten måste konfigureras att ta mätvärden vid korrekt tidpunkt.

En möjlig orsak till att synkroniseringen misslyckas är att fassförskjutningen mellan den drivande och den flytande fasen är ej konstant. Då PWM appliceras på den drivande fasen och ADC mäter på den flytande kan detta leda till mätfel. En tillräckligt lång dödtid från en kommutering innan ADC:n mätningarna aktiveras är nödvändig för att fassförskjutningen inte ska vara för stor för att synkroniseringen ska misslyckas. Samtidigt leder en längre dödtid till en ökad känslighet i och med att risken för att BEMF-spänningen passerar noll under dödtiden. Detta kan undvikas genom att programmera dödtiden i ADC:n som en funktion av hastigheten.

En annan möjlig felkälla till att synkroniseringen inte fungerar är kompileringen av programmet, då assemblerkoden inte har granskats och att samtliga avbrott-hanterare är implementerade i C. Detta kan rimligtvis leda att interrupt genereras långsamt och således blir synkroniseringen med ADC:n förskjuten.

7.1 Svar på frågeställning

- Vilka metoder går det att använda för att styra en borstlös dc-motor med GR716?

Som tidigare påvisat, är det möjligt att styra motorn med hall-sensorer. När det gäller styrning utan sensorer med zero-crossing metoden så är det inte möjligt att besvara med de redovisade resultaten. Om det går att uppnå med vidare arbete på implementationen i programvara eller om förbättring av GR716:s hårdvara krävs går inte att svara på.

- Framkommer problem vid mätning av BEMF med GR716?

Problem som tidigare diskuterats är synkronisering mellan PWM och ADC, särskilt när ADC:n konfigurerats med gränsbevakning. Resultaten visar på störningar när BEMF uppmätts. Orsakerna till störningarna har inte identifierats fullständigt.

7.2 Förslag till vidare arbete

Då GR716 ADC-enhet stödjer extern referens till spänningen kan en virtuell nollpunkt användas. Det kan avlägsna behovet av synkronisera mellan PWM och ADC:n, samt minska förekomsten av störningar. En omarbetning av PCB:t hade krävts för att använda virtuell nollpunkt och därmed var det inte inom avgränsningarna för detta projektet.

Funktioner för PWM samt ADC behöver klockas för att säkerställa tiden som krävs när dessa anropas med C. Detta ger även ytterligare möjligheter att avgöra vilken metod för motorstyrningen som är lämplig att använda, då detta är kritiskt för applikationen.

7.3 Etik

Etiska aspekter av projektet har tagits i beaktande och ingen etisk problematik har identifierats.

Referenser

- [1] ESA ministers commit to biggest ever budget (28 nov. 2019). URL: http://www.esa.int/Newsroom/Press_Releases/ESA_ministers_commit_to_biggest_ever_budget.
- [2] *GR716 Datasheet*. Cobham Gaisler AB. 2019. URL: <https://www.gaisler.com/doc/gr716/gr716-ds-um.pdf>.
- [3] Ernesto Vázquez-Sánchez José Carlos Gamazo-Real och Jaime Gómez-Gil. Position and Speed Control of Brushless DC Motors Using Sensorless Techniques and Application Trends (2010). DOI: 10.3390/s100706901.
- [4] Anpassad svensk rymdverksamhet (31 jan. 2013). URL: https://www.riksrevisionen.se/download/18.78ae827d1605526e94b3004c/1518435478653/Anpassad_svensk_rymdverksamhet.pdf.
- [5] Ward Brown. *Brushless DC Motor Control Made Easy*. Microchip Technology Inc. 2002. ISBN: 978-1-61341-156-8. URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00857b.pdf>.