

Utveckling av en modell för uppskattning av strömförbrukning



Rami Mamoon Alasadi
Mohamed Hassan Salaah

Division of Industrial Electrical Engineering and Automation
Faculty of Engineering, Lund University

Utveckling av en modell för uppskattning av strömförbrukning



**LUNDS
UNIVERSITET**
Lunds Tekniska Högskola

Lunds Tekniska Högskola vid Campus Helsingborg
Institutionen för elektroteknik med automation

Författare:

Mohamed Hassan Salaah

Rami Alasadi

Handledare: Hannes Byden (LTH)

Per Söderberg (BorgWarner)

Jacob Svendenius (BorgWarner)

Examinator: Avo Reinap (LTH)

Mars-Juni 2025

© Copyright <Rami>, <Mohamed>

LTH vid Campus Helsingborg
Lunds universitet
Box 882
251 08 Helsingborg

LTH at Campus Helsingborg
Lund University
Box 882
SE-251 08 Helsingborg
Sweden

Tryckt i Sverige

Lunds universitet

Lund 2025

Sammanfattning

Denna kandidatuppsats beskriver utvecklingen av en bättre modell för att uppskatta den elektriska styrenhetens, (Electrical Control Unit), ECU-strömmen, i ett Gen VI ställdon, vilket används i moderna fyrhjulsdrivna fordon. Projektet genomfördes i samarbete med BorgWarner och är baserat på laborietester och elektriska simuleringar.

Målet med modellen är att förbättra hur exakt ECU-strömmen uppskattas. Detta är viktigt för att använda elektroniska säkringar i bilar, som behöver exakta ström värden för att fungera korrekt. Den nya modellen är fortfarande baserad på en enkel linjär formel men inkluderar bättre beräkningar för arbetscykeln och tar hänsyn till hur temperaturen påverkar spänningsförlusten i halvledarkomponenterna.

Data från cirka 80 testpunkter vid olika temperaturer, spänningar och varvtal användes för att bygga och kontrollera modellen. Resultaten visar att den nya modellen ger bättre uppskattningar än den gamla, särskilt när strömmen är hög. Samtidigt är modellen enkel nog att använda i realtidssystem för bilar utan att behöva mycket datorkraft.

Abstract

This bachelor's thesis describes the development of a better model to estimate the Electrical Control Unit, ECU current in a Gen VI actuator, which is used in modern all-wheel-drive vehicles. The project was done in collaboration with BorgWarner and is based on lab tests and electrical simulations.

The goal of the model is to improve how accurately the ECU current is estimated. This is important for using electronic fuses in cars, which need precise current values to work correctly. The new model is still based on a simple linear formula but includes better calculations for duty cycle and takes into account how temperature affects voltage loss in the semiconductor components.

Data from about 80 test points at different temperatures, voltages, and speeds was used to build and check the model. The results show that the new model gives better estimates than the old one, especially when the current is high. At the same time, the model is simple enough to use in real-time car systems without needing much computing power.

Akronymer

ECU – Electronic Control Unit

BLDC – Brushless DC Motor

FOC – Field-Oriented Control

PWM – Pulse Width Modulation

MOSFET – Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor

AWD – All-Wheel Drive

DC – Direct Current

AC – Alternating Current

PCB – Printed Circuit Board

KL30 – Batterispänning

Förord

Detta examensarbete har genomförts under vårterminen 2025 vid Lunds Tekniska Högskola, Campus Helsingborg, i samarbete med BorgWarner i Landskrona. Projektet har gett möjlighet att kombinera teoretiska kunskaper inom elektroteknik med praktisk tillämpning inom en industrinära miljö.

Vi vill rikta ett stort tack till våra handledare Hannes Byden (LTH), Per Söderberg (BorgWarner), Jacob Svendenius (BorgWarner) för värdefull vägledning, tekniskt stöd och kontinuerlig återkoppling under arbetets gång.

Slutligen vill vi också tacka våra familjer och vänner för deras stöd och tålamod under arbetets gång.

Rami Alasadi & Mohamed Hassan Salaah
Helsingborg, juni 2025

Innehållsförteckning

1. Inledning.....	8
1.1 Bakgrund.....	8
1.2 Syfte.....	8
1.3 Målformulering.....	8
1.4 Problemformulering.....	9
1.5 Motivering av examensarbete.....	9
1.6 Avgränsningar.....	9
1.7 Disposition.....	9
2. Teknisk bakgrund.....	9
2.1. Gen VI aktuator.....	9
2.2. Pumpen i aktuatorn.....	10
2.2.1. Konstruktion och komponenter.....	10
2.3. BLDC motorer.....	11
2.4. Inverter 3-fas.....	12
2.4.1. Kommuteringmetoder.....	13
2.4.2. Förluster i inverter.....	14
2.5. Blockdiagram över Gen VI-aktuators krets och mätpunkter.....	15
2.6. Strömberäkning/estimering.....	15
2.7. Befintlig strömmodell.....	16
3. Metod.....	17
3.1. Informationsinsamling.....	17
3.2. Simuleringar.....	18
3.3. Lab.....	19
3.3.1. Utrustning.....	20
3.3.2. Använda sensorer och mätparametrar.....	20
3.3.3. Träning och process.....	21
3.4. Genomförande.....	21
3.5. Databearbetning.....	22
3.5.1. Mätning av motorström.....	22
3.5.2. Beräkning av duty cycle.....	23
3.5.3. Uppskattning av spänningsfall över MOSFET.....	24
3.5.4. Plot av gamla modell.....	25
4. Analys.....	26
4.1. Övergripande mönster.....	26
4.2. Påverkan av temperatur och varvtal.....	26
4.3. Identifiering av huvudsakliga avvikelser.....	27
4.4. Slutsatser från analysen.....	27
5. Resultat.....	27
5.1 Resultat Tabeller och figurer– medelfel vid olika temperaturer och varvtal.....	28
6. Slutsats.....	31
6.1. Förbättringsmöjligheter.....	32
7. Källförteckning.....	32

1. Inledning

Detta examensarbete syftar till att utveckla en förbättrad modell för uppskattning av styrenhetens (Electrical Control Unit) ECU-strömmen i en Gen VI-aktuator eller ställdon som används i fordonsapplikationer. Arbetet omfattar både simuleringar och laboratorietester samt analys av insamlad data. Målet är att höja noggrannheten i estimeringen av matningsströmmen genom att ta hänsyn till parametrar som varvtal, temperatur och tryck, vilket är viktigt för att kunna hantera övergången till elektroniska säkringar.

Examensarbetet utförs i samarbete med BorgWarner, ett globalt teknikföretag inom fordonsindustrin, som ständigt arbetar med att utveckla mer energieffektiva och tillförlitliga produkter. Arbetet har betydelse både ur ett industriellt och akademiskt perspektiv, då det bidrar till ökad förståelse av strömförbrukning i komplexa system och stärker utvecklingen av framtidens ställdonlösningar.

1.1 Bakgrund

BorgWarner är en global aktör specialiserad på innovativa tekniklösningar för hybrid-, el- och förbränningsfordon. Vid företagets anläggning i Landskrona utvecklas och tillverkas avancerade drivlina- och framdrivningssystem som levereras till fordonstillverkare världen över. Genom kontinuerlig innovation strävar BorgWarner efter att skapa produkter som kombinerar hög prestanda med energieffektivitet och tillförlitlighet.

En viktig del i utvecklingen av moderna transmissionssystem är övergången från traditionella fordonssäkringar till elektroniska säkringar, vilket ställer höga krav på precisionen i uppskattningen av matningsströmmen (supply current). Den uppmätta elmotorströmmen används som underlag för att uppskatta matningsströmmen, vilket ger möjlighet att vidareutveckla och förbättra modellerna för strömestimering.

1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet är att utveckla en modell som med högre noggrannhet kan estimerar ECU-strömmen baserat på uppmätt motorström. Modellen ska ta hänsyn till parametrar som varvtal, temperatur, och motorspänning.

1.3 Målformulering

Målet med arbetet är att:

- Utvärdera befintliga modeller och analysera deras noggrannhet.
- Utveckla och föreslå en förbättrad modell för estimering av ECU-ström.
- Ge rekommendationer för hur modellen kan användas i framtida utvecklingsarbete.

1.4 Problemformulering

För att ytterligare förbättra uppskattningen av ECU-strömmen utifrån motorströmmen krävs en modell som kan ta hänsyn till systemets olika beroende, exempelvis varvtal och temperatur. Detta är en viktig del i utvecklingen av elektroniska säkringar och bidrar till att säkerställa både energieffektivitet och hög tillgänglighet i moderna fordonsapplikationer. Examensarbetet syftar därför till att vidareutveckla den befintliga modellen för strömestimering och skapa en modell med förbättrad precision.

1.5 Motivering av examensarbete

Examensarbetet är väl förankrat i både industriella och akademiska behov. Det bidrar till att stärka BorgWarners utvecklingsarbete med elektriska aktuatorer eller ställdon och möjliggör ännu mer effektiva och pålitliga produkter. Arbetet ger även studenterna möjlighet att utveckla kunskaper inom modellering, simulering och dataanalys i en avancerad industrimiljö, vilket kommer gynna dem i deras ingenjörskarriär.

1.6 Avgränsningar

Projektet fokuserar på elektriska aspekter relaterade till ECU-strömmen och omfattar inte mekaniska faktorer som slitage mekanismer eller långtidsprovning. Simuleringarna i LTspice avgränsas till en nedspänningsomvandlare med två MOSFET:ar, då fullständig simulering av hela bryggan inte är praktiskt genomförbar inom projektets ramar.

1.7 Disposition

Rapporten är strukturerad i sex kapitel som tillsammans ger en tydlig bild av arbetets omfattning och resultat. Kapitel 1 inleder med en introduktion till ämnet, beskriver bakgrund, syfte, mål och avgränsningar. Kapitel 2 presenterar den tekniska bakgrunden och ger en detaljerad genomgång av de centrala komponenterna, inklusive Gen VI-aktuator, BLDC-motorn och styrsystemet. Kapitel 3 redogör för metodiken, inklusive datainsamling, simuleringar, laborativa tester och databearbetning. Kapitel 4 sammanställer resultaten från såväl simuleringar som praktiska tester. I kapitel 5 diskuteras resultaten, inklusive tolkning, analys och jämförelser med tidigare modell. Slutligen sammanfattas arbetet i kapitel 6, där även förslag på framtida arbete och vidareutveckling ges.

2. Teknisk bakgrund

Detta kapitel ger en översikt över de tekniska komponenter och principer som ligger till grund för arbetet. Genomgången omfattar en beskrivning av aktuatoren och dess interna komponenter som är relevanta för förståelsen av strömförbrukning och strömestimering. Eftersom aktuatoren i detta fall driver en elektrisk pumphotor för att cirkulera olja i kopplingen, är energiförbrukningen direkt kopplad till motorns mekaniska arbete.

2.1. Gen VI aktuator

BorgWarners Generation VI-aktuator är en av nyckelkomponenterna de drivline produkter som företaget producerar. Aktuatoren kan dynamiskt styra fördelningen av vridmoment mellan fordonets fram- och bakaxel eller mellan höger och vänster hjul på en axel. Genom att koppla samman eller

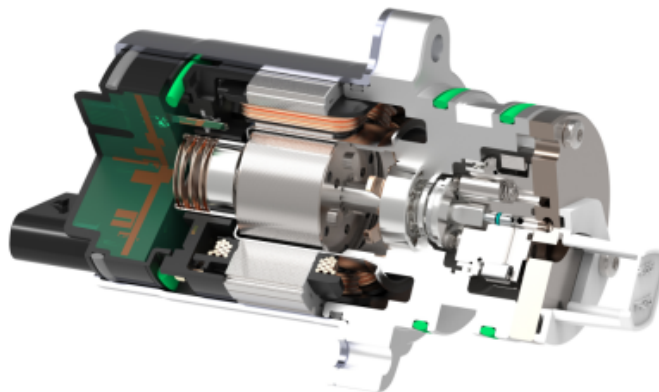
frikoppla drivlinans komponenter i realtid kan aktuatorn förbättra fordonets grepp, hantering och stabilitet under varierande körförhållanden.

Till skillnad från äldre mekaniska system möjliggör denna elektriskt styrda aktuator högre känslighet och exakt reglering av drivmoment, vilket är särskilt värdefullt vid snabba förändringar i väggrepp, som vid acceleration på halt underlag eller i kurvtagning [1].

Aktuatorn består av en integrerad borstlös likströmsmotor (BLDC), en sexkolvs axialpump och en inbyggd elektronisk styrenhet (ECU). Tillsammans bildar dessa komponenter en kompakt och modulär enhet som kan monteras i kraftöverföringssystemet. BLDC-motorn driver den interna pumpen, som genererar det hydrauliska tryck som krävs för att aktivera kopplingen i AWD-systemet. ECU:n hanterar både styralgoritmer och kommunikation med fordonets övriga elektronik [2].

2.2. Pumpen i aktuatorn

I BorgWarners Gen VI-aktuator (se figur 1) ansvarar pumpen för att generera det hydrauliska tryck som krävs för momentöverföring i drivlinesystem. Trycknivån regleras i takt med pumpens rotationshastighet, vilket gör det möjligt att anpassa drivmomentet mellan axlarna beroende på körförhållanden. Denna funktion sker genom en elektriskt driven lösning där både motor, pump och styrelektronik är integrerade i en kompakt enhet.



Figur 1: Gen VI pumpen från BorgWarner [3].

2.2.1. Konstruktion och komponenter

Kärnan i BorgWarners Gen VI-aktuator är en sexkolvs axialpump som tillsammans med en integrerad BLDC-motor och elektronisk styrenhet (ECU) utgör ett komplett hydraulsystem. Komponenterna är utformade för att tillsammans generera och reglera det tryck som krävs för att aktivera fordonets koppling i AWD-systemet [3].

De huvudsakliga delarna är:

- **Centrifugal kontrollerad kolvpump:**
En kompakt axialpump med sex kolvar. Den reglerar trycket i takt med att motorvarvtalet

ökar, genom en inbyggd centrifugal kontrollmekanism. Detta skapar ett direkt samband mellan rotationshastighet och trycknivå, vilket möjliggör snabb och exakt styrning av kopplingen.

- **Borstlös likströmsmotor (BLDC):**

Motorn driver pumpen direkt och möjliggör noggrann styrning av pumpens hastighet. Tack vare sin borstlösa design är den slitstark, värmetålig och lämpar sig för applikationer med hög stop/start-frekvens.

- **Elektronisk styrenhet (ECU):**

ECU:n är placerad direkt på aktuatoren och ansvarar för kommunikation med fordonet samt styrning av BLDC-motorn. Den integrerade designen sparar plats och förbättrar elektromagnetisk kompatibilitet (EMC) och minimerar behovet av externa anslutningar.

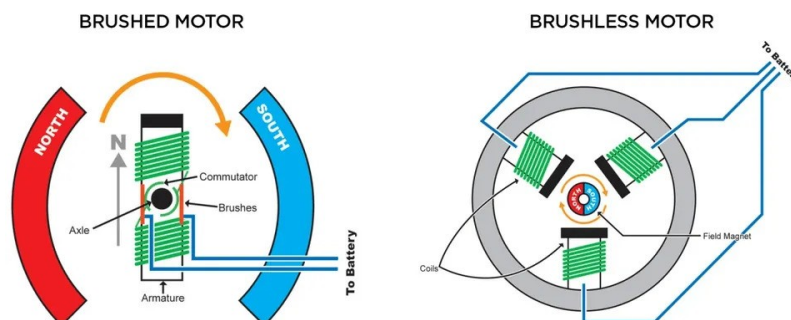
- **Torr stator och våt rotor:**

Motorns stator och styrelektronik är separerade från oljan, vilket ökar driftsäkerheten och minskar risken för skador på elektroniska komponenter. Samtidigt tillåts rotorn rotera i olja, vilket eliminerar behovet av komplex tätning mellan motor och pump.

2.3. BLDC motorer

Borstlösa likströmsmotorer (BLDC) har blivit ett centralt val i moderna elektriska drivsystem tack vare deras kombination av hög verkningsgrad, kompakt format och låga underhållsbehov. De används i allt från hushållsapparater och verktyg till fordon och industriella servodrifter. Det som skiljer en BLDC-motor (se figur 2) från en klassisk likströmsmotor är avsaknaden av borstar och kommutator, funktioner som i stället ersätts av ett elektroniskt styrsystem som sköter kommuteringen. BLDC-motorer har en permanentmagnetrotor och en elektriskt kommuterad stator. Detta eliminerar behovet av borstar och mekanisk kommutator, vilket minskar friktion och ökar både livslängd och effektivitet.

Denna arkitektur eliminerar mekaniskt slitage, minskar värmeutveckling i rotorn och möjliggör noggrann styrning av både moment och varvtal.



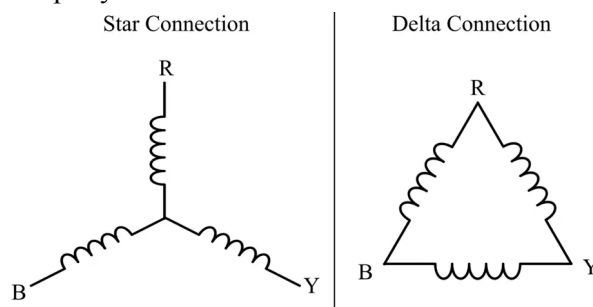
Figur 2: Skillnaden mellan borstade och borstlösa motorer. Borstade motorer använder mekanisk kommutering via borstar, medan borstlösa motorer styrs elektroniskt [4].

Denna typ av motor är särskilt lämplig i tillämpningar med täta start/stopp-cykler, höga krav på precision och begränsat utrymme, såsom i elektriska pumpar, fläktar, verktyg och fordonssystem. Till skillnad från klassiska DC-motorer kräver en BLDC-motor ett externt drivsystem för att styra strömriktningen i statorns lindningar. Denna styrning sker med hjälp av en trefasig växelriktare

(inverter), som i sin tur styrs av en styralgorithm som avgör vilka faser som ska aktiveras beroende på rotorns position. Rotor läget kan bestämmas med hjälp av sensorer, men ofta används även sensorlösa metoder där den inducerade spänningen (back-EMF) analyseras. Eftersom BLDC-motorer inte har intern eller mekanisk kommutering, erbjuder de stor flexibilitet vid styrning. Detta gör dem särskilt intressanta i styrsystem där motorprestanda måste anpassas till olika belastningsfall, vilket är centralt i detta arbete [5].

Beroende på tillämpning och krav kan olika kommuteringsmetoder användas. En vanlig och enkel metod är så kallad six-step (eller trapezoidal) kommutering, där två av tre faser är aktiva åt gången, i sex steg per elektriskt varv. Denna metod är lätt att implementera och ger tillräckligt bra momentkaraktistik för många system, även om den kan ge en viss momenttrippel. För mer avancerade tillämpningar används sinusformad kommutering eller fältorienterad styrning (FOC), där styrningen sker i ett roterande koordinatsystem för att uppnå minimalt brus och maximal verkningsgrad. Dessa metoder kräver dock mer processorkraft och signalbehandling.

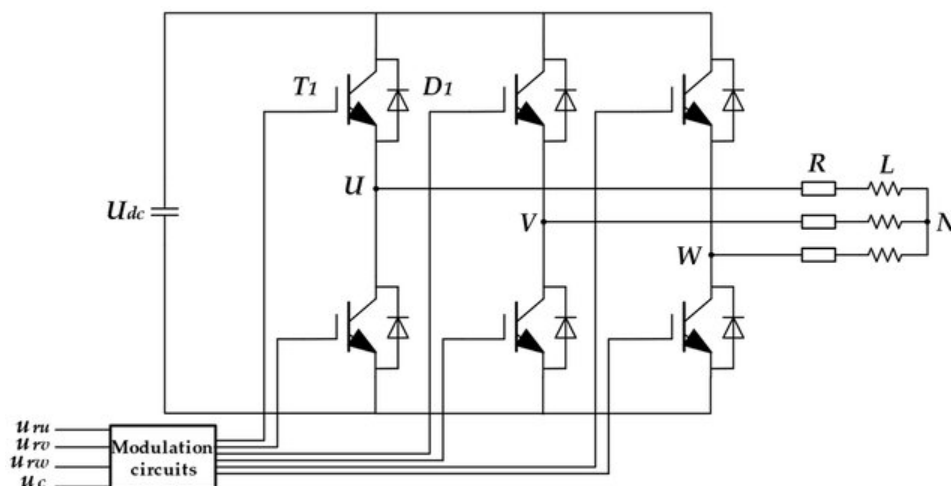
Ytterligare en aspekt som påverkar motorprestandan är lindnings konfigurationen. Vanliga kopplingar är stjärnkoppling (Y) och deltakoppling (Δ) (se figur 3). Generellt gäller att Y-koppling ger högre moment vid låga varvtal och Δ -koppling högre effekt vid höga varvtal om lindningen är densamma. I praktiken kan dock lindningen anpassas efter kopplingstyp, vilket gör att båda alternativen kan ge likvärdig prestanda beroende på systemets krav.



Figur 3: Trefaskopplingar, stjärnkoppling (vänster) och deltakoppling (höger) [6].

2.4. Inverter 3-fas

En trefasig inverter används för att omvandla likspänning (DC) till trefasig växelspanning (AC), och utgör en central komponent vid styrning av elektriska motorer. Inverter används inom ett flertal områden, bland annat elfordon, industriell automation och värme-, ventilation- och luftkonditioneringssystem (HVAC). Genom att generera tre spänningssignaler förskjutna 120° i fas möjliggörs jämn kraftöverföring till roterande maskiner, vilket resulterar i bättre verkningsgrad och mindre vibrationer jämfört med enfasiga lösningar.



Figur 4: Trefas växelriktare (inverter) med sex transistorer [7].

Den topologi som vanligen används består av sex transistorer (MOSFET eller IGBT) (se figur 4), konfigurerade som tre halvbryggor, en för varje fas. Genom att styra dessa transistorer enligt en fördefinierad sekvens kan likspänningen från källan omvandlas till en pulsbreddsmodulerad (PWM) signal som approximativt motsvarar en växelspanning. Den ideala trefasiga växelspanningen beskrivs enligt:

$$\begin{aligned} V_{UN}(t) &= V_m \cdot \sin(\omega t) \\ V_{VN}(t) &= V_m \cdot \sin(\omega t - 120^\circ) \\ V_{WN}(t) &= V_m \cdot \sin(\omega t - 240^\circ) \end{aligned}$$

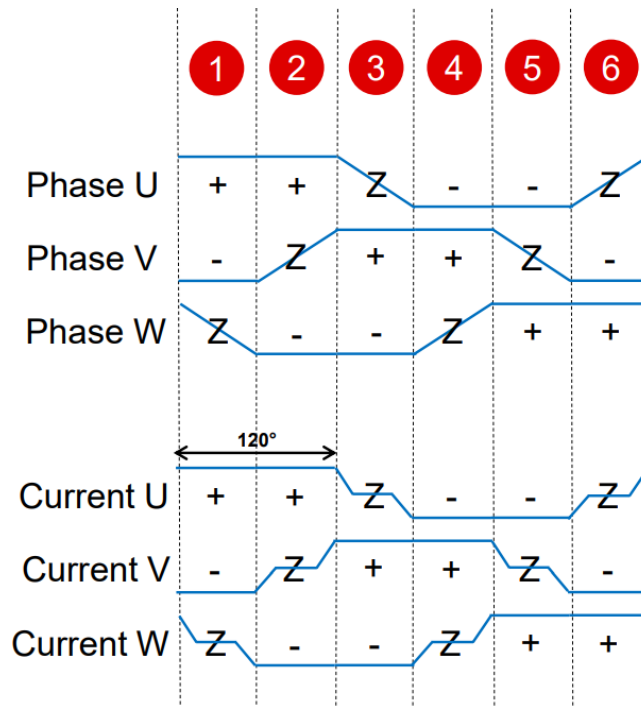
För att generera dessa spänningsförlopp i praktiken används olika kommuteringsmetoder, där varje metod skiljer sig i hur transistorernas switchning styrs över tid. Valet av metod påverkar bland annat motorns momentutveckling, ljudnivå, verkningsgrad och systemets komplexitet.

2.4.1. Kommuteringmetoder

Vid styrning av borstlösa likströmsmotorer (BLDC) finns flera etablerade kommuteringsmetoder, där valet påverkar såväl prestanda som komplexitet och beräknings krav [8]. De fyra vanligaste metoderna är:

- **Trapetsformad kommutering (120°)**

Den enklaste metoden, även kallad six-step kommutering och används i Gen VI pumpen, där två av motorns tre faser är aktiva åt gången i ett cykliskt mönster om sex steg. Varje fas är ledande under 120 elektriska grader, vilket skapar en trapetsformad spänningsprofil (se figur 5). Metoden är kostnadseffektiv och lätt att implementera, men ger upphov till momenttrippel och elektriskt brus. Den är särskilt vanlig i tillämpningar där låg kostnad och enkel styrning prioriteras framför högsta möjliga prestanda.



Figur 5: Six-step-kommutering för en trefas borstlös motor. Diagrammet visar växlingen av fas- och strömriktning i varje steg med 120° fasförskjutning [8]. Bokstaven "Z" markerar en fas som är i high-impedance-läge (öppen/flytande), vilket innebär att den inte driver någon ström under det aktuella steget.

- **Trapetsformad kommutering (150°)**

Denna metod är en vidareutveckling av den traditionella 120° -kommuteringen, där varje fas hålls aktiv under 150 elektriska grader i stället för 120. Genom att förlänga tiden som ström flyter i varje fas förbättras den elektriska jämnheten, vilket resulterar i något tystare drift och jämnare moment. Denna metod används ofta i sensorlösa system eftersom den gör det enklare att känna av motorns rörelse genom den inducerade spänningen (back-EMF), även om den fortfarande ger upphov till viss momenttrippel.

- **Sinusformad kommutering (180° PWM)**

I denna metod moduleras spänningen i varje fas med en varierande PWM-signal för att skapa sinusformade strömmar. Resultatet är jämnare vridmoment och tystare drift, men till priset av ökad komplexitet och switchförluster.

- **Fältorienterad styrning (FOC)**

Fältorienterad styrning är en avancerad kommuteringsmetod som används där hög effektivitet, vridmomentkontroll och ljudlös drift krävs. Metoden styr motorns magnetfält i realtid så att statorns elektriska fält hålls i optimal vinkel mot rotorn. Det maximerar momentet och minimerar energiförlust och vibrationer. FOC kräver mycket beräkningskraft och är mer komplex än enklare metoder, men ger hög prestanda.

2.4.2. Förluster i inverter

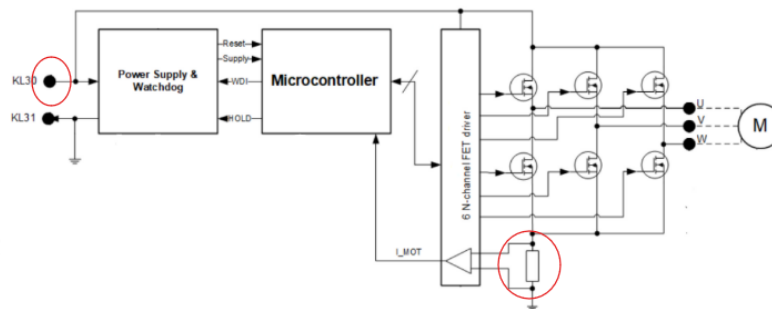
Trots att trefasinvertorn är en central och väletablerad komponent inom motorstyrning, finns flera tekniska utmaningar och förluskällor som påverkar både prestanda och noggrannhet i systemet.

En första typ av förluster uppstår i själva switchningen. Vid varje på- och avslagning av transistorerna förekommer switchförluster, vilket ökar med högre switchfrekvenser. Dessutom införs en dödtid (Dead-time) mellan växlingarna av övre och undre transistorer i samma halvbygga för att undvika kortslutning, men detta kan samtidigt orsaka förvrängningar i utsignalen och påverka motorstyrningen negativt.

Vid ledning uppstår även ledningsförluster, då varje transistor har ett visst motstånd i påslaget tillstånd. Detta leder till värmeutveckling och påverkar verkningsgraden. Ytterligare utmaningar är elektromagnetisk interferens (EMI), som kan störa närliggande elektronik, samt att den praktiska strömmätningen ofta är begränsad till ett fåtal punkter, exempelvis i DC-skenan, snarare än i varje individuell fas.

2.5. Blockdiagram över Gen VI-aktuators krets och mätpunkter

Figur 6 visar ett blockdiagram över Gen VI-aktuatorn. Den elektriska motorn drivs via en 3-fas inverter som styrs av en ECU (elektronisk styrenhet). Mätningen av motorström (I_{motor}) sker över en shuntresistor placerad i den negativa DC-skenan efter MOSFET-bryggan. Denna signal skickas vidare till ECU:n där den används i modellen för att estimerar matningsströmmen (I_{ECU}).



Figur 6: Block diagrammet visar de centrala komponenterna i styrsystemet i Gen VI samt relevanta mätpunkter. Motorströmmen mäts via en shuntresistor i den negativa DC-skenan och batterispänningen (KL30) mäts av ECU:n.

Utöver I_{motor} mäts även batterispänningen (KL30) av styrenheten. Dessa signaler används som ingångar till modellen som estimerar ECU-strömmen (I_{ECU}). Mätpunkterna i figur 6 är därmed direkt kopplade till projekt målet (avsnitt 1.2), då de utgör grunden för den förbättrade strömmodellen som utvecklats i detta examensarbete. Övriga signaler som motorvarvtal, temperatur och tryck registreras också i systemet, men används inte direkt i den gamla modellen.

2.6. Strömberäkning/estimering

För att uppskatta hur mycket ström som tas från matnings sidan kan ett förenklat samband användas då det aktuella systemet inte använder någon separat strömsensor för att mäta ECU-strömmen direkt. Detta är ett medvetet val, främst på grund av kostnadsbegränsningar och det begränsade utrymmet på det kompakta kretskortet. Sambandet baseras på antagandet att den elektriska effekten som tas in i växelriktaren (P_{in}) är lika stor som den som levereras till motorn (P_{ut}), det vill säga:

$$P_{in} = P_{ut}$$

Effekten från matnings sidan (DC-sidan) ges av:

$$P_{in} = U_{DC} \cdot I_{DC}$$

där U_{DC} och I_{DC} är matningen som i detta sammanhang är från ett bilbatteri.

Effekten som motorn tar emot från växelriktaren beror på den genomsnittliga matningsspänningen in under PWM-cykeln. Vid PWM-styrning med duty cycle D (transistorkopplingsperiod där full spänning appliceras över motorn) gäller:

$$U_{motor} = D \cdot U_{DC}$$

Antas motorn vara resistiv eller att dess last förändras långsamt (dvs. steady-state), så blir den mottagna effekten:

$$P_{ut} = U_{motor} \cdot I_{motor} = D \cdot U_{DC} \cdot I_{motor}$$

Vilket ger det samband som används i det aktuella systemet:

$$I_{DC} = D \cdot I_{motor}$$

Detta uttryck används i förenklade modeller för att uppskatta den ström som tas från kraftförsörjningen, baserat på motorström och PWM-styrning. Det bygger på antagandet om stationär drift och försumbara förluster, vilket är förekommande i system med begränsad dynamik och välkända driftbetingelser.

2.7. Befintlig strömmodell

I det befintliga systemet i figur 7 uppskattas ECU-strömmen (strömmen som förbrukas av aktuatorns styrsystem) med hjälp av en linjär modell baserad på motorströmmen och den tillämpade PWM-driften. Modellen bygger vidare på sambandet $I_{DC} = D \cdot I_{motor}$ men anpassas för praktiska variationer i spänningsnivåer och komponentbeteende.

Modellen uttrycks som:

$$I_{ECU} = ECUCurrGain \cdot D \cdot I_{motor} + ECUCurrOffset$$

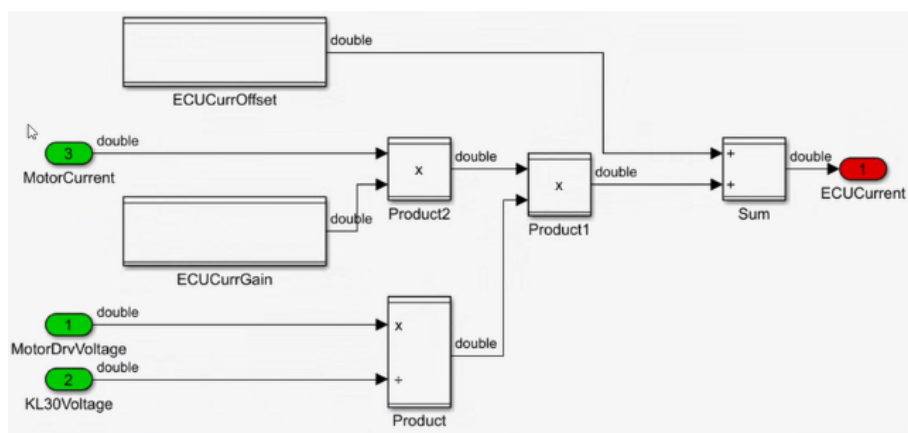
där:

- D är duty cycle (förhållandet mellan motorspänning och batterispänning)
- I_{motor} är den uppmätta motorströmmen
- $ECUCurrGain$ är en förstärkningsfaktor under 1
- $ECUCurrOffset$ är ett konstant offsetvärde runt 0,5

Duty cycle beräknas dynamiskt i modellen som kvoten mellan motorspänningen och batterispänningen (refererat som KL30), enligt:

$$D = \frac{U_{motor}}{U_{DC}}$$

Dessa parametrar har tagits fram genom tidigare mätningar, empiriska justeringar samt enklare modellering antaganden. Även om modellen är linjär och inte tar hänsyn till alla icke-linjära fenomen i växelriktare och motor, har den visat sig tillräckligt noggrann för att användas i realtidssystem med låg komplexitet.



Figur 7: Den tidigare modellen för estimering av ECU-ström.

3. Metod

Detta kapitel beskriver den metodik som använts för att samla in data från labbmätningar, genomföra simuleringar, testa systemet i laborativ miljö samt bearbeta mätdata i syfte att utveckla och validera en modell för uppskattning av strömförbrukning. Följande delkapitel beskriver steg för steg hur arbetet genomförts.

3.1. Informationsinsamling

Arbetet inleddes med en insamlingsfas där befintliga testdata från tidigare tester analyserades. Denna historiska data användes för att identifiera relevanta testpunkter och utvärdera vilka varvtals- och temperaturintervall som tidigare hade använts. Särskild vikt lades vid att förstå vilka parametrar som haft störst påverkan på strömförbrukningen.

Efter analys av tidigare data valdes ett antal testpunkter som ansågs vara mest intressanta för att vidareutveckla ström uppskattningsmodellen. Dessa punkter markerades i en matris (se Tabellerna 1,2,3 som visar mätresultat på de valda testpunkter vid olika matningsspänning och hur hög ECU ström var vid de testpunkter), där kombinationer av temperatur och motorvarvtal valdes ut baserat på representativitet och förväntad variation i ström.

Tabell 1: Valda testpunkter vid 11 V matningsspänning och hur hög ECU-strömmen [A] var för driftfallen.

Temperatur [deg C] Varvtal[rad/s]	−20	−10	0	10	20	30	40	60	80
150	5,34	3,02	2,05	1,35	1,10	0,98	0,94	0,90	0,93
300	15,83								
350	15,86	15,58	14,06	11,49	10,35	9,71	9,30	9,23	9,46
400	15,89	15,54	13,99	12,82	12,33	11,93	11,74	11,55	11,54
450									

Tabell 2: Valda testpunkter vid 13 V matningsspänning och hur hög ECU-strömmen [A] var för driftfallen.

Temperatur [deg C] Varvtal[rad/s]	-20	-10	0	10	20	30	40	60	80
150	3,71	2,53	1,73	1,16	0,6	0,85	0,82	0,79	0,80
300									
350	15,24	15,21							7,88
400	15,28	15,21	15,27	14,60	12,95	12,24	11,82	11,68	11,87
450			15,28	15,33	15,00	14,60	14,30	14,05	

Tabell 3: Valda testpunkter vid 15 V matningsspänning och hur hög ECU-strömmen [A] var för driftfallen.

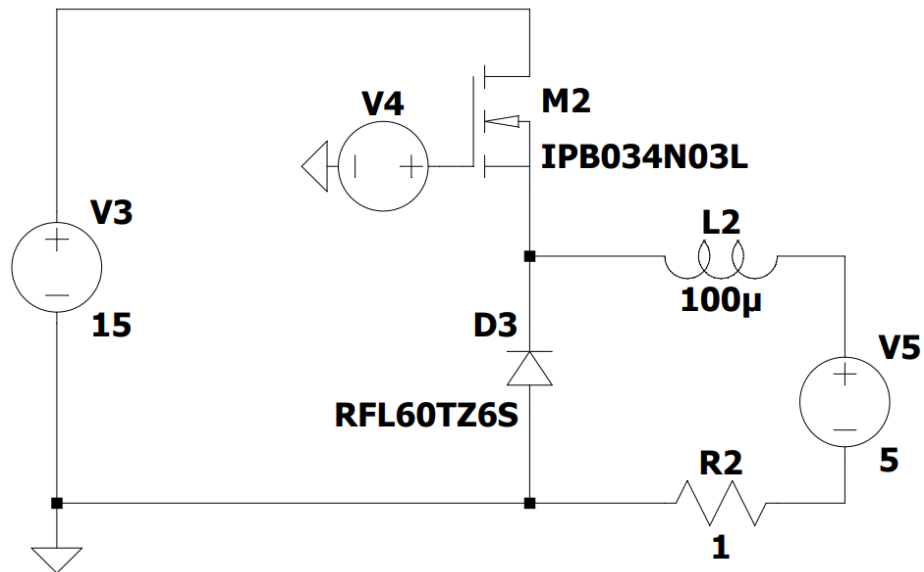
Temperatur [deg C] Varvtal[rad/s]	-20	-10	0	10	20	30	40	60	80
150	4,36	2,18	1,50	1,02	0,86	0,76	0,73	0,70	0,73
300									
350	15,25	13,64							6,74
400	15,26	15,19	14,18	12,38	11,17	10,46	10,05	9,84	9,88
450			15,32	15,35	15,30	15,25	14,90	14,68	

3.2. Simuleringar

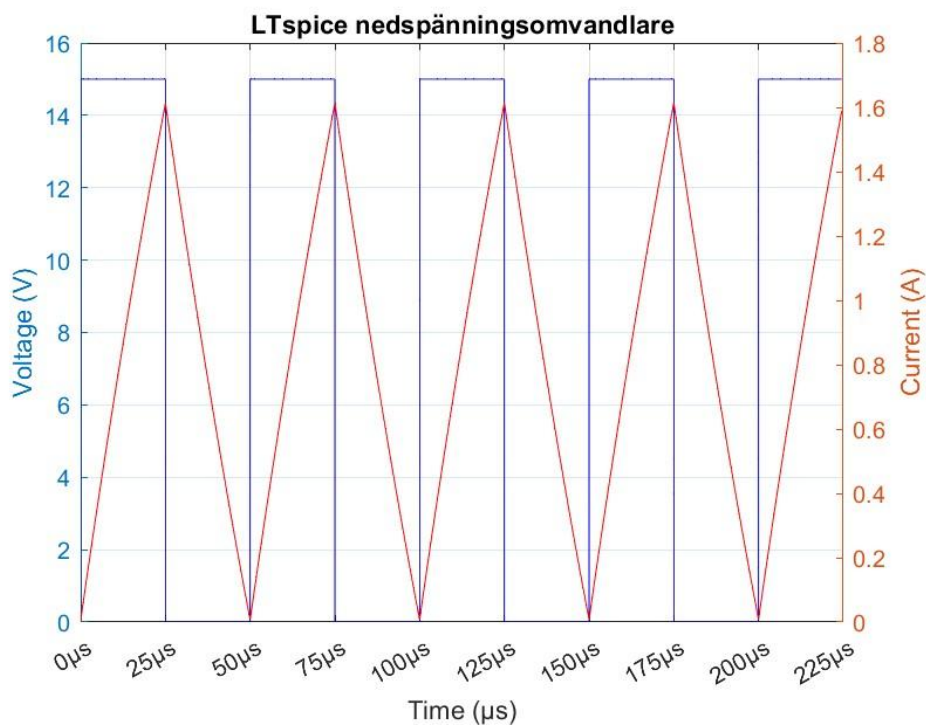
För att analysera systemets elektriska beteende används LTspice för simuleringar av bryggan. Syftet med dessa simuleringar är att undersöka strömmarnas fördelning i kretsen, både genom MOSFET:arna och i lasten. På grund av kretsens komplexitet simuleras inte hela bryggan med sex MOSFET:ar, utan analysen begränsas till en förenklad nedspänningsomvandlare (buck converter), bestående av två MOSFET:ar (IPB034N03L) enligt figur 8. Denna krets är inte en exakt kopia av en verklig drivkrets, utan en förenklad modell som används för att förstå strömbanan och komponentbelastningar.

Komponentvärden såsom R2, L2 och spänningskällorna (V3, V4, V5) i figur 8 är hypotetiska och valdes utifrån typiska värden för att möjliggöra stabil simulering, efterlikna motorstyrning och tydligt visualisera strömmar. Denna metodik kan användas för att analysera principiella samband mellan komponenter i ett förenklat men illustrativt sammanhang.

Simuleringarna från LTspice i figur 9 visar hur strömmen flödar genom de enskilda komponenterna, såsom spolar, dioder och MOSFET:ar, och hur variationer i styrsignaler och last påverkar strömfördelningen.



Figur 8: elektriska schema för en nedspänningsomvandlare.



Figur 9: simulering av nedspänningsomvandlare.

3.3. Lab

Detta avsnitt beskriver den experimentella uppställningen och det praktiska genomförandet av de tester som genomfördes.

3.3.1. Utrustning

För att genomföra de praktiska testerna användes en konfigurerbar testmiljö som visas i figur 10 som inkluderade följande utrustning:

- **Temperaturkammare** (klimatskåp): Användes för att simulera olika driftförhållanden mellan -20°C och +80°C, vilket speglar verkliga drift scenarier för en Gen VI-aktuator i fordon.
- **Pump Test Unit från BorgWarner**: En specialanpassad testtrigg för testning av elektriskt styrda aktuatorer. Enheten möjliggör styrning och mätning av aktuatorns rörelser och kraftutveckling. En bild på testtriggen bifogas ner (figur 10).
- **CAN-baserad kommunikationslösning**: Möjliggör realtidskommunikation mellan test objektet och datorn samt styrning av signaler via en ECU (Electronic Control Unit).
- **Spänningsaggregat**: Justerbart nätaggregat användes för att mata systemet med olika spänningsnivåer (11 V, 13 V och 15 V), för att studera påverkan på strömförbrukning.
- **Dataloggningssystem** (PC med NI DAQ och DIAdem): Insamling och visualisering av data i realtid.



Figur 10: Pump Test Unit från BorgWarner

3.3.2. Använda sensorer och mätparametrar

För att kunna analysera aktuatorns beteende under olika testförhållanden användes flera typer av sensorer kopplade till Pump Test Unit. Dessa sensorer gjorde det möjligt att mäta elektriska och hydrauliska parametrar i realtid, vilket var avgörande för att både kunna genomföra testerna säkert och samla in data med tillräcklig noggrannhet för modellutveckling.

Strömmätningen utfördes med hjälp av en extern strömsensor som placerades i matningsledningen som visas i figur 6 mellan spänningsaggregatet och ECU:n. Denna sensor registrerade den faktiska strömförbrukningen för ECU:n och användes som referens vid jämförelse mot den ström som

estimerades av den interna modellen. På motsvarande sätt mättes även motorströmmen internt i ECU:n, vilket rapporterades via CAN och loggades.

För att följa spänningsnivån installerades en spänningssensor vid ECU-kontakten. Den mätte spänningen som tillfördes systemet från nätaggregatet (11 V, 13 V eller 15V beroende på testfall) och låg till grund för beräkningar av duty cycle. Denna sensor var integrerad i testupställningens kopplingssystem och loggades tillsammans med övriga signaler.

En temperatursensor placerades i oljepump för att mäta vätsketemperaturen under test. Denna sensor satt direkt i oljan och gav ett stabilt och direkt mått på den temperatur som pumpen faktiskt arbetade under. Tester genomfördes vid ett brett temperaturintervall, från -20 °C upp till +80 °C, för att utvärdera modellens prestanda under olika omgivningsförhållanden.

Även det hydrauliska trycket i systemet mättes under testerna. En trycksensor registrerade det verkliga trycket som pumpen genererade, vilket jämfördes med ECU:ns interna tryckestimering.

Utöver dessa fysiska mätningar registrerades även flera interna signaler från ECU:n via CAN-kommunikation. Bland dessa fanns den uppmätta motorströmmen, motorspänningen, aktuell och önskad motorhastighet, där vissa avvikelser kunde observeras mellan den aktuella och den önskade hastigheten vid olika testpunkter. Dessa skillnader var dock marginella och påverkade inte nämnvärt uppskattningen av ECU-strömmen. Temperaturen på kretskortet (PCB) registrerades också. Batterispänningen från fordonets strömsystem, den så kallade batterispänning, loggades också för att följa variationer under belastning. ECU:n rapporterade även estimerade parametrar som pumpens huvudenhetstemperatur, vilka samlades in för att jämföras med de uppmätta motsvarigheterna.

3.3.3. Träning och process

Innan de omfattande mätningar genomfördes, började man med ett antal träningstester vid rumstemperatur för att säkerställa att hela testsystemet fungerade som avsett. Syftet med denna fas var att verifiera att kommunikationen mellan testsystemet och datainsamlingssystemet var stabil, att alla sensorer gav korrekta signaler, samt att styrningen av aktuatorn via CAN-bussen fungerade utan avbrott. Under träningstesterna kördes systemet igenom med varierande varvtal och spänningsnivåer exempelvis som i testmatrisen (Tabell 1, 2 och 3), och resultaten loggades i datorn. Denna fas var avgörande för att minimera risken för fel under de faktiska testerna.

3.4. Genomförande

Efter verifiering och kalibrering av testmiljön påbörjades de planerade mätningarna. Inför varje testdag konfigurerades temperaturkammaren till den önskade temperaturen. För testdagen vid -20°C sänktes exempelvis temperaturen redan kvällen innan för att garantera att både testutrustningen och komponenterna stabiliserats vid rätt omgivningstemperatur när mätningarna påbörjades.

Testerna genomfördes enligt en fördefinierad testmatris som inkluderade kombinationer av temperaturer (-20°C, -10°C, 0°C, 10°C, 20°C, 30°C, 40°C, 60°C och 80°C), varvtal (150, 300, 350, 400 och 450 rad/s) samt matningsspänningar (11 V, 13 V och 15V). Vid varje testpunkt mättes följande parametrar: motorström, ECU ström, batterispänning, motorspänning, varvtal, tryck, temperatur i kammaren.

Varje testcykel omfattar en sekvens där motorn accelererades från 70 rad/s upp till det önskade varvtalet enligt testmatrisen (se tabell 1, 2 och 3). Vid uppnått målvarvtal hålls hastigheten stabil i cirka tre sekunder för att möjliggöra insamling av mätdata under stationära förhållanden. Därefter retarderades motorn tillbaka till 70 rad/s. Endast en cykel genomförs per testpunkt, vilket möjliggör genomförandet av samtliga testpunkter inom ramen för de tre testdagarna. Samtliga relevanta parametrar registreras noggrant under cykeln för efterföljande analys.

3.5. Databearbetning

Efter insamling av mätdata från testkörningarna genomfördes en omfattande bearbetningsfas för att möjliggöra analys och utveckling av den förenklade strömmodellen. Databearbetningen kombinerade både automatiserad och manuell hantering i olika mjukvaruverktyg som Matlab och Excel.

Till att börja med bearbetades rådata med hjälp av ett DIAdem-skript som togs fram och kördes av handledaren. Detta skript användes för att automatiskt dela upp loggfilerna, som omfattade cirka 8000 datapunkter vardera, och identifiera de mest relevanta tidsintervallen. Syftet var att utesluta perioder med så kallad "idle speed" eller tomgångskörning, där motorn inte var vid önskat varvtal, och i stället isolera tre sekunder där systemet var i drift och motorn hade uppnått en stabil arbetspunkt. Handledaren ordnade därefter färdigbehandlade datafiler med medelvärden från dessa sekvenser, vilket förenklade den fortsatta analysen.

De sammanställda medelvärdena importerades sedan till Excel för vidare bearbetning och analys. Här strukturerades data för att möjliggöra jämförelser mellan olika parametrar såsom temperatur, varvtal, duty cycle och motorström. Genom att använda verktyget LINEST utfördes linjär regressionsanalys för att bestämma modellparametrarna, framför allt gain och offset för den strömmodell som utvecklades. Denna modell användes för att uppskatta ECU-strömmen utifrån den uppmätta motorströmmen och styrsignalen (duty cycle).

Parallellt med bearbetningen i Excel användes även MATLAB för att visualisera data. Genom att plotta mätpunkter och modellresultat kunde tydliga mönster observeras och eventuella avvikelser identifieras. Visualiseringarna var ett viktigt stöd vid tolkningen av resultaten och användes som underlag för justering och fintrimning av modellen.

Sammanfattningsvis genomfördes databearbetningen som ett iterativt arbete där analys, visualisering och modellutveckling skedde parallellt, med syfte att ta fram en modell som på ett tillförlitligt sätt uppskattar strömförbrukningen under olika driftförhållanden.

3.5.1. Mätning av motorström

En viktig aspekt vid analysen av strömförbrukning är förståelsen för hur motorströmmen faktiskt mäts. Detta klargjordes först i slutskedet av arbetet i dialog med handledaren under en genomgång av de insamlade signalerna. Genom att visualisera motorströmmen med hög upplösning i DIAdem blev det tydligt att ECU:n inte använder ett medelvärde över hela PWM-cykeln, utan i stället beräknar strömmen baserat på de sista sex sampelvärdena i varje switchingcykel. Detta resulterade i ett systematiskt för högt rapporterat värde, vilket syns i figur 11.



Figur 11: Illustration av hur ECU:n beräknar motorströmmen utifrån ett medelvärde av sampelvärden mot slutet av varje driftcykel. Den röda linjen visar den beräknade strömmen (baserat på sex sista sampel i detta exempel), medan den gröna linjen visar det faktiska medelvärdet över hela cykeln. Tidsintervallet 0–2 ms representerar en driftcykel, följt av ett nytt steg. Skillnaden mellan de två kurvorna illustrerar överskattningen i det rapporterade värdet. Figuren är inte baserad på verkliga mätdata, utan är en schematisk och något överdriven visualisering för att tydliggöra principen.

Denna metod innebär att mätvärdet förskjuts mot slutet av varje driftcykel, en del av perioden där strömrippeln tenderar att vara som störst. Detta påverkar det rapporterade värdet av motorströmmen, eftersom det genomsnitt som rapporteras blir något högre än det verkliga medelvärdet över hela cykeln. Den ökade strömrippeln mot slutet av switchingperioden kan bero på flera faktorer i kretsens dynamik men kan kopplas till last och driftfall. För att kompensera för denna överskattning används en gain-faktor lägre än 1 direkt i strömmodellen. Värdet korrigeras alltså inte i ECU:n, utan i den modell som används för att estimerar ECU-strömmen, genom en skalning av det uppmätta ström värdet.

Denna gain eller förstärkningsfaktor har samma funktion som ECUCurrGain, men i stället för att använda det befintliga parametriserade värdet beräknades en ny anpassad gain-faktor utifrån ny mätdata, vilket beskrivs i kapitel 3 (metod) och kapitel 4 (analys).

3.5.2. Beräkning av duty cycle

I den befintliga modellen beräknas duty cycle som kvoten mellan motorspänning och batterispänning, enligt sambandet:

$$D = \frac{U_{motor}}{U_{DC}}$$

Där U_{motor} inte är ett direkt uppmätt signal, utan ett internt börvärde som beräknas i ECU:n. Detta börvärde genereras i realtid som en del av den varvtalsreglering som ECU:n genomför: efter att den mätt det aktuella varvtalet jämförs det med ett börvärde, och baserat på reglerfelet beräknas ett nytt spänningsbörvärde för motorn. Denna beräknade spänning används därefter för att generera en PWM-signal med tillhörande duty cycle. Det är detta beräknade duty cycle-värde (D) som i sin tur exporteras och används i den förenklade strömmodellen.

Eftersom varken U_{motor} eller PWM-signalen mäts direkt, innebär detta att eventuella spänningsfall som uppstår i kretsen, till exempel över de två aktiva MOSFET:arna under en switchingcykel inte kan

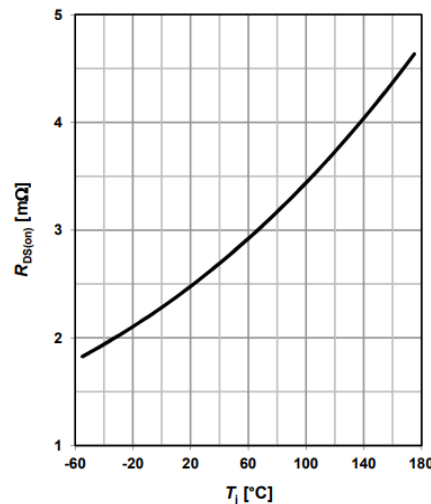
observeras. För att ta hänsyn till dessa spänningsfall i modellen infördes en justerad beräkning av duty cycle. Den nya beräkningen använder fortfarande det beräknade värdet av U_{motor} men divideras med batterispänning minus ett värde för MOSFET-spänningsfall:

$$D = \frac{U_{motor}}{U_{DC} - 2 * U_{mosfet}}$$

Där U_{mosfet} är det approximativa spänningsfallet över två aktiva MOSFET:ar. Denna metod används i estimeringsmodellen för att ge en mer realistisk duty cycle och därmed en mer noggrann uppskattning av ECU-strömmen.

3.5.3. Uppskattning av spänningsfall över MOSFET

För att uppskatta spänningsfallet över de två aktiva MOSFET:arna i varje switchcykel användes en temperaturberoende modell baserad på komponentens resistiva egenskaper. MOSFET:arnas interna resistans $R_{DS(on)}$ varierar med temperatur, och tillverkarens data (från datablad [9], (se figur 12)) visade att detta samband kan approximeras som linjärt över ett relevant temperaturområde.



Figur 12: MOSFET:ens drain-source-resistans $R_{DS(on)}$ som funktion av junctionstemperatur T_j , enligt datablad [9].

Det användes då det inbyggda temperaturvärdet från ECU:ns kretskort (PCB-temp), som är den temperatur som ligger närmast MOSFET:arnas fysiska placering. Genom att använda en linjär approximation av $R_{DS(on)}$ som funktion av PCB-temp kunde ett approximativt värde på motståndet beräknas:

$$R_{DS(on)} = k * T + m$$

Där T är PCB-temp och k, m är parametrar bestämda från databladets graf.

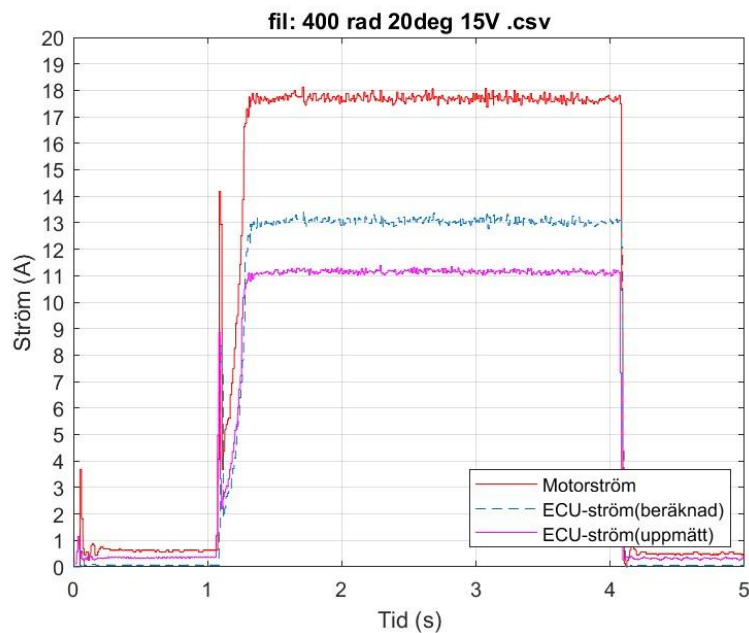
Spänningsfallet över två MOSFET:ar beräknades därefter enligt Ohms lag:

$$U_{mosfet} = 2 * R_{DS(on)} * I_{motor}$$

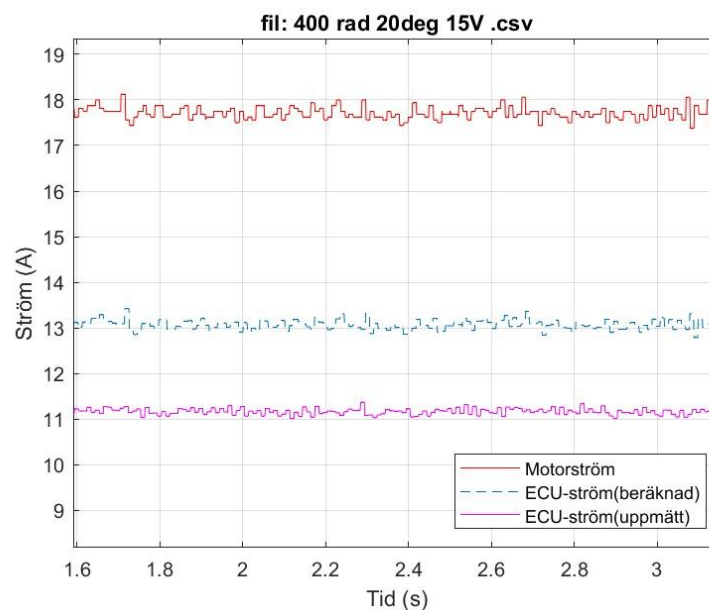
Där I_{motor} är den uppmätta motorströmmen justerad med den gain-faktor (Ny beräknad EcuCurrGain) som tidigare beskrivits.

3.5.4. Plot av gamla modell

Efter simuleringarna i LTspice används MATLAB för att bearbeta och visualisera de mätdata som samlats in under labbtesterna. Resultaten importerar från CSV-filer, och MATLAB används för att plotta bland annat motorströmmen, den uppmätta ECU-strömmen samt den befintliga ECU strömestimeringen. Dessa visualiseringar i figur 13 och 14 används för att jämföra mätdata och identifiera avvikelser samt för att utvärdera systemets prestanda. Diagram och grafer som visar simuleringar och plottning som visas i kapitel 5.



Figur 13: Ett resultat från labbtesterna ($D \approx 75\%$) på uppmätta och beräknade strömmar i aktuatorn erhållen från MATLAB.



Figur 14: En mer inzoomad av plottningen i figur 13.

4. Analys

Efter att mätdata samlats in och bearbetats enligt metodkapitlet inleddes analysen med syfte att identifiera samband mellan olika driftparametrar och den ström som dras från matningssidan (ECU-strömmen). Målet var att utvärdera den befintliga modellens noggrannhet samt undersöka möjliga förbättringar.

4.1. Övergripande mönster

För att möjliggöra en effektiv analys kombinerades de färdigbehandlade datafilerna från DIAdem med visualiseringar i MATLAB. Genom att plotta ECU-ström, motorström, duty cycle samt andra parametrar kunde mönster och avvikelser identifieras. Redan i ett tidigt skede framkom att relationen mellan motorström och ECU-ström följde till en stor del en linjär trend, vilket är förenligt med den förenklade modellen där:

$$I_{DC} = D \cdot I_{motor}$$

Där I_{DC} representerar ECU-strömmen, D är duty cycle och I_{motor} är motorströmmen.

4.2. Påverkan av temperatur och varvtal

För att undersöka om övriga parametrar som temperatur och varvtal kunde användas för att förbättra modellen, analyserades data uppdelad efter dessa faktorer. Särskilt fokus lades på att jämföra modellens noggrannhet vid extrema temperaturer och vid varierande varvtal.

Resultaten visade dock inga tydliga eller entydiga samband. Vid vissa temperaturer och varvtal förbättrades noggrannheten marginellt när dessa parametrar inkluderades i modellen, medan den i andra fall snarare försämrades. Detta antyder att påverkan från temperatur och varvtal inte är linjär eller konsekvent nog för att integreras på ett effektivt sätt i en förenklad modell.

4.3. Identifiering av huvudsakliga avvikelser

En viktig observation var att modellens prestanda varierade mest vid höga strömnivåer. I dessa fall kunde modellen, särskilt i sin enklaste form, visa på tydliga avvikelser jämfört med uppmätta värden. Vid lägre strömnivåer var överensstämmelsen överlag god.

Vid analysen av dessa avvikelser övervägdes potentiella förklaringar. En trolig faktor var inverterförluster, exempelvis lednings- och switchförluster i MOSFET:arna, vilka blir mer påtagliga vid högre strömmar. Detta styrktes också av att felmarginalerna minskade när en linjär modell med anpassad lutning och offset (framtagna via linjär regression i Excel med verktyget LINEST) användes.

4.4. Slutsatser från analysen

Analysen visade att den befintliga modellen i sin enklaste form har vissa begränsningar, särskilt vid högre strömnivåer. Samtidigt stod det klart att försöken att förbättra modellen genom att införa temperatur- och varvtalsberoende termer inte gav avsedda resultat.

Det mest framgångsrika sättet visade sig i stället vara att utgå från en linjär modell baserad på motorström och duty cycle, kompletterad med en optimerad lutning och offset. Denna strategi gav en

tillräckligt noggrann approximation av ECU-strömmen för det aktuella systemets behov, utan att modellen blev onödigt komplex eller svår att implementera.

5. Resultat

Baserat på observationerna från analysen utvecklades en ny estimeringsmodell med målet att förbättra noggrannheten vid beräkning av ECU-strömmen, särskilt vid högre strömnivåer där den tidigare modellen visade avvikelser. Den nya modellen behåller en linjär struktur, men kompletteras med förbättrad beräkning av duty cycle samt uppdaterade modellparametrar.

Enligt resultatet från utvärderingen har den nya modellen ett markant lägre fel vid kritiska driftfall som låga temperaturer eller höga varvtal jämfört med den tidigare modellen. I flera fall är felet mindre än hälften så stort, vilket innebär en väsentlig förbättring av modellens tillförlitlighet i de situationer där det är viktigast att inte underskatta strömförbrukningen vilket var ett problem i den gamla modellen. Detta är särskilt avgörande då säkringen måste lösa ut korrekt vid hög belastning för att skydda systemet. En modell som underskattar strömmen i dessa lägen riskerar att förhindra utlöst säkring eller fördröja skyddsåtgärder, vilket kan leda till överhettning eller skada på komponenter. Därför är denna förbättring inte bara en statistisk fördel utan har direkt betydelse för systemets funktion och säkerhet.

Modellen har följande form:

$$I_{ECU} = \frac{U_{motor}}{U_{batteri} - 2 * U_{mosfet}} * I_{motor} * G + O$$

där:

- U_{motor} är motorspänningen (beräknat börvärde från ECU),
- $U_{batteri}$ är den uppmätta batterispänningen,
- U_{mosfet} är det uppskattade spänningsfallet över två MOSFET:ar (se avsnitt 3.5.3) beräknad med motorströmmen och gain G,
- I_{motor} är den uppmätta motorströmmen
- G och O är modellparametrar (gain och offset), beräknade med linjär regression utifrån data från idealfall.

Modellen tar hänsyn till förluster som spänningsfall på komponenter i drivsteget genom att korrigera duty cycle-beräkningen, vilket ger ett mer realistiskt förhållande mellan motorspänning och batterispänning. Genom att använda en dynamiskt beräknad duty cycle, som inkluderar temperaturberoende MOSFET-förluster, minskas modellens känslighet för variationer i spänning och belastning.

Jämfört med tidigare formuleringar används här samma ingångsparametrar, men på ett mer detaljerat sätt, vilket gör modellen bättre anpassad för driftfall med högre ström där modell noggrannhet är mest kritisk.

5.1 Resultat Tabeller och figurer– medelfel vid olika temperaturer och varvtal

Resultaten från utvärderingen av den nya estimeringsmodellen redovisas i två separata tabeller. Tabellerna 4 och 5 visar medelfelet i procent vid olika temperaturer, både med och utan datapunkter vid 150 rad/s inkluderade. Utöver detta anges den genomsnittliga absoluta skillnaden i ampere mellan estimerad och uppmätt ECU-ström. Tabellerna 6 och 7 visar medelfelet i procent vid olika motorvarvtal samt motsvarande fel uttryckt i ampere. Figuren 15 och 16 visar ett resultat från Matlab med den nya modell som skulle jämföras med figuren 13 och 14.

Tabell 4: Medelfel (%) och fel i ampere vid olika temperaturer i den nya modellen.

Temperatur	Felet i procent	Felet i procent (utan 150 rad)	Felet i ampere
-20	1,90%	2,23%	0,25
-10	2,07%	2,05%	0,22
0	3,56%	2,16%	0,24
10	6,40%	2,09%	0,24
20	8,29%	2,31%	0,26
30	10,18%	2,51%	0,27
40	10,28%	2,67%	0,28
60	12,27%	3,39%	0,34
80	12,31%	3,80%	0,33

Tabell 5: Medelfel (%) och fel i ampere vid olika temperaturer i den gamla modellen.

Temperatur	Felet i procent	Felet i procent (utan 150 rad)	Felet i ampere
-20	11,93%	9,43%	1,26
-10	13,13%	8,82%	1,07
0	13,91%	8,09%	0,94
10	15,41%	8,40%	0,87
20	16,25%	8,40%	0,81
30	16,50%	8,39%	0,78
40	17,12%	8,36%	0,75
60	16,09%	7,82%	0,69
80	16,23%	8,35%	0,6

Tabell 6: Medelfel (%) och fel i ampere vid olika varvtal i den nya modellen.

Radianer	Felet i procent	Felet i ampere
150	12,68%	0,16
300	1,83%	0,29
350	2,67%	0,3
400	2,63%	0,33
450	2,39%	0,35

Tabell 7: Medelfel (%) och fel i ampere vid olika varvtal i den gamla modellen.

Radianer	Felet i procent	Felet i ampere
150	28,72%	0,39
300	11,59%	1,83
350	8,91%	1,06
400	8,37%	1,07
450	7,86%	1,17

Tabell 8: Felet i test punkterna i 15V, den gröna färgen är den nya modellen medan röda är den gamla.

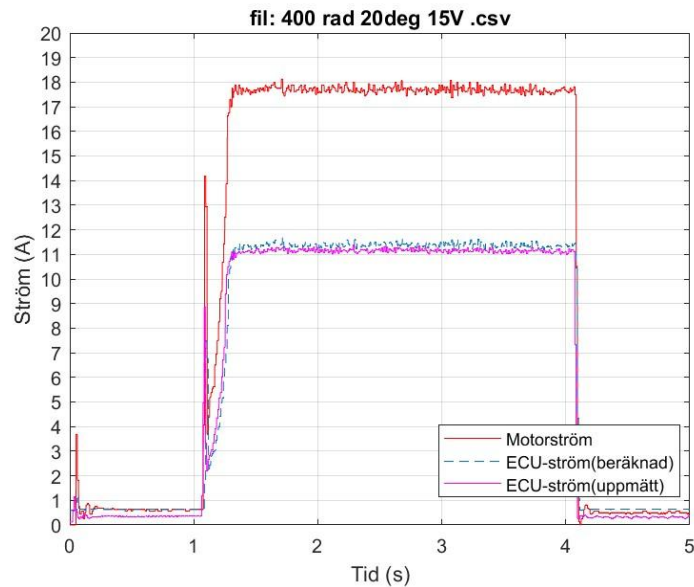
Temperatur [deg C] Varvtal[rad/s]	-20	-10	0	10	20	30	40	60	80
150	-0,04A -1,13% -0,72A -19,43%	0,07A 3,18% -0,51A -23,48%	0,12A 7,85% -0,42A -27,84%	0,18A 18,01% -0,33A -31,66%	0,2A 23,55% -0,30A -34,37%	0,23A 30,36% -0,26A -34,54%	0,22A 30,51% -0,27A 36,33%	0,25A 35,74% -0,24A -34,04%	0,25A 33,49% -0,25A 34,04%
350	0,4A 2,60% -1,15A -7,55%	0,29A 2,11% -1,13A -8,29%							0,23A 3,38% -0,70A -10,30%
400	0,39A 2,58% -1,16A -7,78%	0,4A 2,62% -1,14A -7,52%	0,36A 2,53% -1,11A -7,80%	0,29A 2,33% -1,04A -8,39%	0,28A 2,48% -0,96A -8,59%	0,24A 2,29% -0,94A -9,01%	0,22A 2,21% -0,93A 9,28%	0,31A 3,12% -0,84A -8,56%	0,35A 3,57% -0,81A -8,16%
450			0,34A 2,24% -1,21A -7,88%	0,29A 1,88% -1,26A -8,20%	0,34A 2,21% -1,21A -7,93%	0,36A 2,35% -1,19A -7,83%	0,39A 2,59% -1,14A -7,68%	0,46A 3,14% -1,07A -7,25%	

Tabellerna 4–7 visar medelfel och fel i ampere för både den gamla och nya modellen, uppdelat efter temperaturer och varvtal. Även om dessa tabeller ger en bra översikt av modellernas generella noggrannhet, är det lätt att fokusera på fel vid låga belastningar där skillnaderna ibland är små. Det viktiga i detta sammanhang är dock inte medelfelet i sig, utan hur väl modellen presterar under de driftfall där strömmen är hög och säkringen kan behöva lösa ut. För att tydliggöra detta presenteras därför Tabell 8, där en direkt jämförelse mellan modellerna görs vid 15 V som är det mest relevanta driftfallet för systemet.

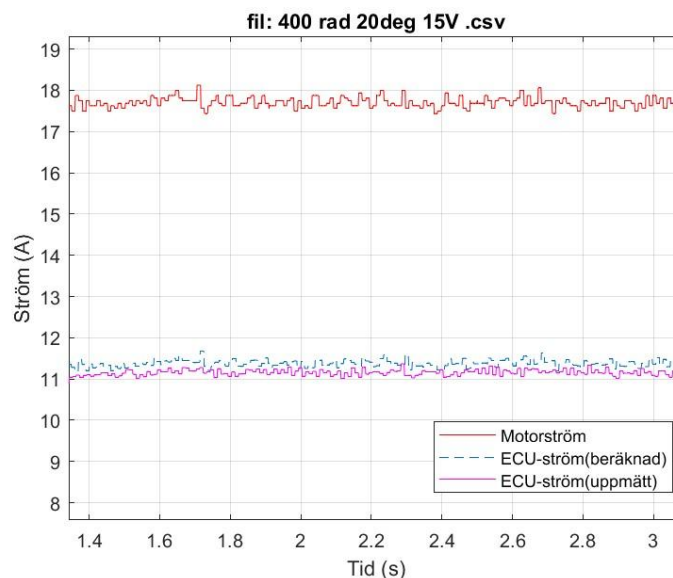
Tabell 8 visar en direkt jämförelse mellan den gamla och nya modellen vid 15 V, vilket är det mest relevanta driftfallet för det aktuella systemet. Tabellen visualiserar både absolut fel i ampere och relativt fel i procent för respektive testpunkt. De gröna värdena representerar den nya modellen medan de röda tillhör den tidigare modellen.

Skillnaderna är särskilt tydliga vid höga strömmar, exempelvis vid låga temperaturer eller höga varvtal, där den tidigare modellen tenderar att kraftigt överskatta eller underskatta strömmen. Vid exempelvis -20 °C och 450 rad/s minskar felet från över 1,2 A till under 0,3 A, vilket motsvarar en förbättring på över 75 %. Liknande förbättringar ses även vid 400 och 350 rad/s under kalla förhållanden. Det är just i dessa punkter som noggrannheten är avgörande för att säkringen ska kunna reagera korrekt och i tid.

Förbättringarna är därmed inte bara av teoretisk betydelse utan har direkt praktisk relevans för säkringens funktion och fordonets driftssäkerhet. Den nya modellen minskar risken för att säkringen löser ut i onödan eller inte löser ut när den borde, vilket förbättrar systemets tillförlitlighet.



Figur 15: Ett resultat från labbtesterna ($D \approx 75\%$) på uppmätta och beräknade strömmar (med ny modell) i aktuatoren erhållen från MATLAB.



Figur 16: En mer inzoomad av plottningen i figur 15.

6. Slutsats

Målet med detta examensarbete var att utveckla en förbättrad modell för uppskattning av ECU-ström i en Gen VI-aktuator. Arbetet motiverades av behovet att möjliggöra elektroniska säkringar, vilket ställer höga krav på noggrannhet i strömetimeringen. Den tidigare modellen, som byggde på en linjär relation mellan duty cycle och motorström, har fungerat väl inom sitt tillämpningsområde. Samtidigt identifierades möjligheter att öka modellens precision, särskilt i driftfall med högre strömbelastning där noggrannheten blir extra kritisk.

Genom analys av data från cirka 80 testpunkter under varierande temperaturer, varvtal och spänningsnivåer kunde en ny modell utvecklas som behåller den linjära grundstrukturen, men introducerar en förbättrad beräkning av duty cycle. Modellen tar även hänsyn till temperaturberoende

spänningsfall över MOSFET:ar i växelriktarens drivsteg. Detta ger ett mer realistiskt förhållande mellan motorspänning och tillgänglig batterispänning.

Dessutom visade analysen av mätprincipen (se Figur 11) att ECU:n systematiskt överskattar motorströmmen. En gain eller förstärkning fanns redan implementerad, men genom att förstå orsaken bakom överskattningen kunde vi motivera dess existens och beräkna om faktorn baserat på ett bredare mätintervall, vilket förbättrade modellens noggrannhet ytterligare.

En viktig del i förbättringen var att parametrarna för gain eller förstärkning och offset bestämdes genom linjär regression baserat på testdata som spände över hela det undersökta temperaturområdet, från -20 °C till +80 °C. Detta bidrar till att modellen uppvisar god noggrannhet över ett bredare arbetsområde och minskar känsligheten för temperaturvariationer, vilket i sin tur ökar robustheten i praktiska tillämpningar.

Jämfört med tidigare lösning visar den nya modellen förbättrad överensstämmelse med uppmätta värden, särskilt vid höga strömnivåer. Samtidigt bevaras en låg beräkningskomplexitet, vilket gör modellen väl lämpad för implementering i realtidssystem med begränsade resurser.

6.1. Förbättringsmöjligheter

För att ytterligare förbättra modellens precision kan det vara fördelaktigt att undersöka alternativa strukturer bortom den linjära formuleringen. Genom att modellera ECU-strömmen som en icke-linjär funktion av exempelvis motorström, temperatur och varvtal kan fler dynamiska samband fångas upp. En icke-linjär modell, exempelvis med polynomiska eller exponentiella uttryck, kan vara bättre anpassad till de variationer som uppstår vid låga varvtal, där den nuvarande modellen visar begränsningar.

En annan möjlig förbättring är att analysera motorströmmen mer i detalj vid respektive testpunkt. Genom att studera kurvornas form och variation över tid går det att identifiera mönster och systematiska avvikelser i mätvärdena. Baserat på denna analys kan en driftberoende förstärkningsfaktor införas, som justeras individuellt för varje driftpunkt. På så sätt kan modellen kompensera för skillnader i mätbeteende och ge en mer träffsäker estimering utan att förlora sin generella enkelhet.

Utöver dessa modellrelaterade förbättringar finns även mer fundamentala alternativ att överväga. Ett möjligt nästa steg är att använda en AI-baserad modell för att ersätta den linjära strukturen helt. Med hjälp av maskininlärningsalgoritmer, exempelvis regressionsbaserade metoder eller enklare neurala nätverk, skulle man kunna fånga upp komplexa icke-linjära samband mellan ström, temperatur, varvtal och andra parametrar utan att uttryckligen behöva formulera dem. Detta kräver dock mer data, samt noggrann validering för att säkerställa tillförlitlighet i systemet.

Det mest robusta sättet att eliminera modellfel vore dock att införa en dedikerad strömsensor på ECU-sidan. Genom direkt mätning tas osäkerheten i modelleringen bort helt, vilket säkerställer hög precision även vid varierande driftförhållanden. Nackdelen är ökade kostnader och komplexitet, men vid system där ström noggrannhet är avgörande kan detta vara ett motiverat val.

7. Källförteckning

- [1] BorgWarner, "Brushless DC motor brings amazing performance to BorgWarner's new AWD coupling," Aug. 22, 2019. [Online]. Tillgänglig: <https://www.borgwarner.com/newsroom/press-releases/2019/08/22/brushless-dc-motor-brings-amazing-performance-to-borgwarner-s-new-awd-coupling> (Besökt: 10 Apr. 2025).
- [2] C. Månsson, M. Ranåker, and P. Söderberg, "BorgWarner's next-gen AWD actuators spell gains for OEMs," Autocar Professional, May 21, 2020. [Online]. Tillgänglig: <https://www.autocarpro.in/feature/borgwarner-nextgen-awd-actuators-spell-gains-for-oems-56410> (Besökt: 13 Apr. 2025).
- [3] C. Månsson, M. Ranåker, and P. Söderberg, "Next generation AWD actuators," BorgWarner, Knowledge Library, 2020. [Online]. Tillgänglig: <https://www.borgwarner.com/docs/default-source/default-document-library/next-generation-awd-actuators.pdf> (Besökt: 13 Mar. 2025).
- [4] T-Drones, "What is a brushless motor and how it works: A detailed guide," Mar. 19, 2024. [Online]. Tillgänglig: <https://www.t-drones.com/blog/brushless-motor.html> (Besökt: 14 Apr. 2025).
- [5] P. Yedamale, "Brushless DC (BLDC) motor fundamentals," Microchip Technology Inc., Application Note AN885, 2003. [Online]. Tillgänglig: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00885a.pdf> (Besökt: 20 Apr. 2025).
- [6] Electrical Volt, "Three phase transformer connections." [Online]. Tillgänglig: <https://www.electricalvolt.com/three-phase-transformer-connections/> (Besökt: 20 Apr. 2025).
- [7] C. Zhou, B. Gao, H. Yang, X. Zhang, J. Liu, and L. Li, "Junction temperature prediction of insulated-gate bipolar transistors in wind power systems based on an improved Honey Badger algorithm," Energies, vol. 15, no. 19, p. 7366, Oct. 2022. [Online]. Tillgänglig: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/19/7366> (Besökt: 21 Apr. 2025).
- [8] A. Barrera, "Comparison of commutation methods," Texas Instruments, [Online]. Tillgänglig: https://www.ti.com/content/dam/videos/external-videos/en-us/5/3816841626001/6146059129001.mp4/subassets/comparison_of_commutation_methods.pdf (Besökt: 20 Apr. 2025).
- [9] Infineon Technologies AG, "IPZ40N04S5-3R1 data sheet," Rev. 1.1, Jul. 27, 2015. [Online]. Tillgänglig: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IPZ40N04S5-3R1-DS-v01_01-EN.pdf?fileId=5546d4624cb7f111014d660139b148a4 (Besökt: 10 Maj. 2025).