CHALMERS

Analys och dimensionering av en elektrisk drivlina för Chalmers Formula Students tävlingsbil.

Kandidatarbete inom Elteknik

Ahmet Arikan
Matilda Hildesson
Sebastian Larqvist
Oscar Lindström Rignell
Sivan Poules

Institutionen för Energi & Miljö
Chalmers Tekniska Högskola
Göteborg, Sverige 2015

Abstract

Previous years the Chalmers Formula Student project has involved the usage of combustion engines for propulsion of vehicles. In consideration of global awareness of the need for alternate sources of energy, Chalmers Formula Student team has strived to modify their source of propulsion to an electrical powered engine.

Towards achieving this, the following project has specifically strived towards optimizing the drivetrain for such an electrically powered vehicle.

Demand for such a project is created due to the nature of the organization, which is first and foremost a competition. Within the regulations for the competition, a means for retrieving necessary data for the design of such a vehicle is crucial to the Chalmers Formula Student projects success. Hence this project has created a means to identify the relation between key parameters and the possibility to predict their influence on the final competition score.

In consideration of the means available to the group responsible for the project, the results are generated and concluded by the means of computer generated simulations. As basis for these simulations, thorough investigations concerning key components have been carried out. Modeling using stimulatory programs, mainly Simulink has been the focal point around which all other studies have been carried out. Continuous simulations have been performed to confirm the validity of the results, and in length to ascertain data useable for dimensioning.

Results of the simulations show that a 3% increase of the points is possible using a drivetrain containing two 44 Nm PMSM motors, a lithium-cobalt battery with 210 cells and a car weight on 270 kg.

Sammanfattning

Förbränningsmotorer har föregående år varit en central aspekt rörande driften av fordon inom Chalmers Formula Student projektet. Med hänsyn till global medvetenhet kring behovet av alternativa energikällor, så har Chalmers Formula Student konverterat från denna tidigare angivna drivkälla till en elektriskt driven motor. Följande projekt har specifikt strävat efter att optimera drivlinan för ett sådant elfordon.

Efterfrågan på ett projekt av detta slag, rörandes optimering av drivlinan uppstår då Chalmers Formula Student laget ej har tid för djupare studier kring detta ämne, samt då huvudsakliga ändamålet är utförandet av prestandamätande tävlingar. Inom ramverket som utgörs av reglerna för tävlingen är det nödvändigt för projektet att finna metoder som möjliggör att nödvändig data erhålls och kan utnyttjas för att effektivt utforma fordonet. Därigenom har detta projekt strävat efter att skapa metoder för att finna relationer mellan nyckelparametrar, samt deras inverkan på det slutliga tävlingsresultatet.

Med hänsyn till de medel som funnits tillgängliga för projektgruppen är de resultat och slutsatser som erhållits, samt utarbetats, baserade på datorgenererade simuleringar. Som underlag för dessa simuleringar har grundliga undersökningar kring valda komponenter utförts. Modellering- och simuleringsprogram, främst Simulink, har varit huvudfokus kring vilket samtliga studier har utförts. Kontinuerliga simuleringar med olikartade förändringar i parametrar som rör valda komponenter har utförts för att bekräfta validiteten hos resultaten, och förvissa gruppen om att data erhållits som kan utnyttjas för dimensioneringen av drivlinan.

Simuleringarna resulterade i att en ökning av poängen på 3% med en drivlina bestående av två stycken PMSM motorer på 44 Nm, ett Litium Kobolt batteri på 210 celler med en växelomriktare och en massa på Formula-bilen på 270kg.

Innehållsförteckning

1. Inledning ... 1
1.1 Bakgrund ... 1
1.1.1 Generell Bakgrund ... 1
1.1.2 Applicerade Regler ... 2
1.2 Syfte ... 3
1.3 Problemformulering ... 3
1.4 Avgränsningar ... 4
1.5 Metod ... 4
2. Formula Student Underlag ... 7
2.1 Beskrivning av de Dynamiska Tävlingsmoment ... 7
2.1.1 Acceleration ... 7
2.1.2 Skidpad- loppet ... 7
2.1.3 Autocross ... 8
2.1.4 Endurance inklusive Efficiency ... 9
2.2 Beskrivning av Chalmers Formula Student bilen ... 10
2.3 Loggad data från Silverstone 2012 ... 11
3. Elektrisk drivlina ... 13
3.1 Motor ... 13
3.2 Batterier ... 16
3.2.1 Nickel/metall-hybridbatteri (Ni-MH) ... 17
3.2.2 Litium jon batterier (li-ion) ... 17
3.3 Växelomriktaren ... 18
4. Fordonsdynamik ... 21
4.1 Luftmotstånd ... 22
4.2 Longitudinella däckkraften ... 23
4.2.1 Viktförskjutning ... 23
4.2.2 Slip ... 24
4.3 Rullmotstånd ... 25
5. Simuleringsmodellen ... 27
5.1 Batterimodellen ... 27
5.1.1 Beräkning på batteri ... 30
5.2 Motormodell ... 32
5.3 Kör-rutts-diagram ... 33
6. Resultat ... 37

6.1 Simuleringsmodellen 37
6.2 Motor 40
6.3 Batteri 42
6.4 Parameteroptimering 46
7. Diskussion och rekommendation på dimensionering 51
7.1 Simuleringsmodellen 51
7.2 Motor 52
7.3 Batteri 52
7.4 Växelomriktaren 53
7.5 Massa 53
8. Slutsats 55
Referenslista 56
Bilagor 58
Bilaga A 58
Bilaga B 59

1. Inledning

1.1 Bakgrund

1.1.1 Generell Bakgrund

Formula Student är ett utbildningsprojekt där ingenjörsstudenter lär sig att analysera olika komponenter, designa och bygga en tävlingsbil med god prestanda, samt med ett konkurrenskraftigt marknadsvärde. Slutligen inleds tävlingar mot andra universitet i en av världens största ingenjörsstudenttävlingar [1][2]. Tävlingarna är uppdelade i två olika moment. Syftet med tävlingen är att samla ihop så många poäng som möjligt i de olika delmomenten, men lagets poäng bygger inte endast på den egna Formula-bilens resultat utan även för hur det går för motståndarna. Det första momentet är en så kallad statiskt tävlingsgren där följande punkter bedöms med olikt fördelade poäng, vilkas maximala poäng åskådliggörs nedan:

- **Designen** - *visar på innovation kring design och tekniska problem* (150p)
- **Fiktivt business case** - *presentation av affärsstrategi utförs, denna skall övertyga domare om bilens måluppfyllnad och funktion relaterat till kraven hos målgruppen, icke-professionella autocross-förare, samt marknadsföringsmöjligheterna hos bilen.* (75p)
- **Kostnad & Tillverkning** - *kostnadsberäkningar, tillverkningstekniker och involverade processer bedöms.* (100p)

Det statiska momentet kan sammanlagt ge 325 poäng [3]. Det andra momentet brukar benämnas som en dynamisk tävlingsgren där bilen körs på bana enligt följande former och poängfördelning:

- **Auto-cross** - *sprintlopp* (150p)
- **Skidpad** - *bana likt en 8:a* (50p)
- **Acceleration** - *75 m rakt fram* (75p)
- **Endurance *inklusive Efficiency*** - *22 km uthållighetstest* (400p)

Det dynamiska momentet kan sammanlagt ge 675 poäng. Totalt kan hela tävlingen ge 1000 poäng och vinnaren är det lag med högst poäng [1][3].
Vid tävlingarna finns sponsorer och representanter för flera stora företag inom bland annat bilindustrin. För universiteten medför detta möjligheter som publicitet samt visa upp att de kan leverera morgondagens ingenjörer, för studenterna ger detta en chans att skapa viktiga kontakter för yrkeslivet och framtiden [2][4]. Utöver detta skapas ett tillfälle att fördjupa sina färdigheter gällande ingenjörsmässigt och vetenskapligt arbetssätt. En viktig aspekt som ligger till grund för detta projekt är den akademiska synvinkeln där Chalmers Tekniska Högskola AB vill lära studenter att utveckla och fördjupa sina kunskaper inom detta ovannämnda arbetssätt [5].
Chalmers Tekniska Högskola AB har varit med och tävlat sedan år 2002 i klassen för förbränningsmotorer och under 2013 började alternativa drivlinor utforskas, mer specifikt elektriska alternativ. Det är drivlinan som står för driften av bilen och består av komponenter som möjliggör energi- och kraftöverföring från en energikälla till rörelseenergi. Då Chalmers Tekniska Högskola AB strävar efter en hållbar framtid

med förnyelsebar energi, bestämdes det att inför säsongen 2015 skulle Chalmers Formula Student endast köra med en elektrisk drivlina [6]. Det är även av intresse att analysera elektriska drivlinor för bilindustrin då det finns ett behov av att finna alternativa drivmedel.

2015 är första säsongen då Chalmers Tekniska Högskola AB designar en Formula-bil med en elektrisk drivlina från grunden. Detta medför en stor utmaning i jämförelse med tidigare år då det råder brist på data och erfarenhet för dimensionering av en elektrisk drivlina. Anledningen till att detta projekt uppkommit är då det råder tidsbrist i Chalmers Formula Student projektet, då studenterna har cirka 8-10 veckor på sig att analysera och designa alla komponenter i Formula-bilen. Flertalet oklarheter existerar kring hur en elektrisk drivlina ska dimensioneras för att erhålla bästa möjliga förhållande mellan prestanda och marknadsvärde, resulterande i maximalt antal poäng i Formula Student-tävlingen. Därav existerar ett behov av att finna lösningsmöjligheter till dessa oklarheter, vilket detta projekt strävar efter att åstadkomma, som hjälpmedel för kommande Formula Student projekt. Tävlingen är uppbyggd med många olika moment vilket resulterar i att flera olika variabler och begränsningar måste identifiera och tas hänsyn till när drivlinan designas, vilket resulterar i ett multi-dimensionellt problem. För att kunna få så många poäng som möjligt måste hänsyn tas till regelverk, motståndarnas prestationer och Formula-bilens förutsättningar. Maximering av poäng kommer att ligga till grund för denna rapport och genom en analys av elektriska drivlinor kan detta komma att hjälpa framtida Formula Student-lag på Chalmers Tekniska Högskola AB.

1.1.2 Applicerade Regler

Nödvändigt regelverk att ta i aktning vid dimensionering av motorer enligt regelverket för FSAE - Formula Society of Automitive Engineering 2015 [7].

- Endast elektriska motorer får användas, dock är inte antalet motorer begränsat.

Nödvändigt regelverk att ta i aktning vid dimensionering av batteriet enligt regelverket för FSAE - Formula Society of Automitive Engineering 2015 [7].

- Den maximala effekten ifrån batteriet får inte överstiga 80 kW.
- Alla ackumulatorer så kallade laddningsbara batterier är accepterade

Följande regler bidrar enbart med kännedom kring de krav som måste uppfyllas på batterimiljön. De kommer i slutändan att resultera i olika bidrag på Formula-bilens totalvikt, men kommer ej att betraktas vidare i projektet.

- Alla celler eller superkondensatorer måste omslutas med en ackumulator behållare.
- Batterisystemen måste monteras med ett Batteriövervakningsystem
- Batteriövervakningsystemet måste mäta spänningen av varje cell för att cellerna ska hålla den maximala samt minimala spänningsgränsen. Om cellerna parallellkopplas behövs endast en spänningsmätare.
- Batteriövervakningsystem måste kontrollera temperaturen av dem kritiska punkterna i batteriet för att hålla cellerna inom begränsad temperatur eller under 60°c beroende på vilket som är lägst.

- Batteripack på litium-batterier måste ha ett överspänning, underspänning, kortslutnings och över temperaturs skydd men även en brandvägg mellan batteripacket och föraren.

1.2 Syfte

Syftet med detta projekt är att ge ett förslag på dimensioneringen av en elektrisk drivlina och dess ingående parametrar för en Formula Student bil, detta för att kunna samla ihop så mycket poäng som möjligt i de dynamiska tävlingsmomenten.

1.3 Problemformulering

Utnyttjandet av en elektrisk drivlina till fördel mot en förbränningsmotor gör att detta projekt står inför en utmaning. Som hjälpmedel i denna utmaning kommer registrerad kördata från 2012 års lopp att användas där bensindrift nyttjades. Även om datan gäller för en förbränningsmotor så är fordonsdynamiken likadan, vilket gör att det möjligt att använda detta för optimerandet av den elektriska drivlinan.

De dynamiska tävlingsgrenarna skiljer sig mycket från varandra med uthållighet i Endurance till aggressiv körning och snabba tider i Sprint, samt Acceleration. Utmaningen blir då att kunna dimensionera en drivlina som är anpassad till alla de dynamiska tävlingsgrenarna samtidigt som att säkerställa att så många poäng som möjligt kan plockas. Sammantaget bör Formula-bilen klara av Endurance på 22 km.

Komponenterna som väljs skall vara enligt regelverket för Formula Student så att specifikationerna uppfylls. Exempelvis kan det ses i regelverket att utgående effekt från batteriet inte får överstiga 80 kW samt att spänningen inte får vara högre än 600 V [7].

De komponenter som normalt sätt ingår i dimensioneringen för den elektriska drivlinan är motor, växellåda, batteri, samt kraftelektronik för att omvandla spänning mellan batteri och motor. Detta är de grundläggande och viktigaste komponenterna som den elektriska drivlinan består av, och därför är det av ytterst vikt och intresse att betrakta dessa komponenter i dimensioneringen av en drivlina.

Under projektets gång kommer några centrala frågor att söka besvaras. Inkluderat i dessa frågor är hur komponenter bör väljas för att erhålla en optimerad prestanda utav bilen, samt de ingående komponenternas bidrag till systemet. Mer ingående innebär detta att se över hur vissa specifika parametrar som är applicerbara på drivlinans komponenter påverkar det kompletta systemet som är Formula-bilen. Utöver detta har svar erhållits på hur förändringar av dessa komponent-parametrar kan komma att påverka Formula-bilens slutresultat i form utav den erhållna poängen i Formula Student-tävlingar. I längden söks svar på hur komponenter och parametrar bör väljas för att erhålla maximalt antal poäng i Formula Student-tävlingarna.

1.4 Avgränsningar

Optimering av den elektriska drivlinan innebär för projektet att analysera bilens totala prestanda vilket ska resultera i så höga poäng som möjligt på de dynamiska momenten. Hänsyn kommer inte visas de statiska momenten då ekonomiska aspekter inte iakttas, detta till skillnad från Chalmers Formula Student-projektet.

Formula-bilen modelleras som en 2-hjulsmodell, ett hjul fram och ett bak, med ett centrerat masscentrum. Modellen kommer även att bortse från hjulupphängningen, och kommer därför att simuleras som stel. För att kunna analysera all fordonsdynamik som påverkar bilen så tillämpas avgränsningen att använda kördata från Chalmers Tekniska Högskola AB's lag på Formula Students event på Silverstone 2012. Detta på grund av att 2012 är det senaste år då det finns kvalitativ data från ett projekt med goda tävlingsresultat. Denna data kommer att fungera som en mall i den meningen att hastigheterna i kurvorna kommer att anses vara det snabbaste Formula-bilen kan köra. Detta tillåter att fordonsdynamiken i kurvorna inte behöver betraktas. Vikten hos en Formula-bil uppskattas med den befintligt byggda eldrivna bilen (2015).

I detta arbete betraktas växellådan endast som en utväxlingskomponent mellan motorn och däcken. En djupare litteraturstudie eller analys av förluster i växellådan och kuggar kommer inte att inkluderas i detta arbete. Projektet betraktar i viss mån kraftelektronik, men utan fokus kommer ligga på val av motor och batteri. Verkningsgrader betraktas i viss mån då systemet anses arbeta under optimala förutsättningar. Komponenter som rekommenderas vid resultatet skall vara godkända enligt Formula Students reglemente.

1.5 Metod

Flera metoder för uppfyllandet av projektets syfte existerar, i detta fall har en metod baserat på simuleringar valts. Möjligheter utöver simuleringsmetoden inkluderar fysiskt konstruerandet av en eller flera delar utav drivlinan, metoden tillämpas inte på grund av tidsbrist såväl som på grund utav den ekonomiska belastningen detta hade utgjort. Ytterligare existerar möjligheten att utföra uppgiften analytiskt utan datorbaserade hjälpmedel, vilket även detta anses alltför tidskrävande.

För att uppnå det önskade resultatet har arbetet delats upp i tre områden. Det inledande uppgiftsområdet som behandlades är framställningen av kör-rutts-diagram. Dessa visar hastigheten som funktion av sträckan, samt möjliggör identifieringen av hastighetsbegränsningarna i kurvorna. För att genomföra detta krävs att data från tidigare lopp, huvudsakligen Silverstone (2012), analyseras med hjälp av programvaran Race Technology, vilken den insamlade datan är ämnad att hanteras med.

Data från Race Technology exporterades för att användas i Matlab. Här skapas kör-rutts-diagrammen, där hastighet plottas gentemot sträcka. Dessa diagram används för att identifiera hastigheter i kurvor som senare kommer att utnyttjas för

dimensionering av drivlinan. Ytterligare identifierades lutningen på bromskurvor för att sedan implementeras i kör-rutts-diagrammen.

Då ovanstående färdigställts övergick projektet till skapandet av en dynamisk modell. Det första steget mot detta var en litteraturstudie, information rörande skapandet av 2-hjulsmodeller, slip-kurvor som åskådliggör huruvida däck och bil har grepp eller om hjulspinn inträffar. Detta kan resultera i effekt- och tidsförluster, även regelverk och andra tävlingsanvisningar för Formula Student krävs här beaktas. Med en färdig 2-hjulsmodell inklusive implementerade avgränsningar var det möjligt att börja arbeta med det elektriska systemet. Simulink används för att simulera nyttjandet av de samtliga ingående komponenter. För att skapa detta system krävdes att programmerandet föregicks av en litteraturstudie, angående inkluderade komponenternas och systemets uppbyggnad. Det elektriska systemet kopplas efter försäkran om korrekt funktion samman med 2-hjulsmodellen för att komplett kunna simulera det tänkta systemet. Här söks relationen mellan energin ur batteriet i form av ström och spänning, samt effekten på däcket, detta krävs för dimensioneringen av drivlinan.

Det slutliga steget är att iterera simuleringar av det kompletta systemet med små förändringar för att uppnå ett förbättrat lösningförslag. Utgångsläge för optimering i modellen är då samma prestanda som den data som analyserats från loppen på Silverstone (2012) erhålls. Avgränsningar minskar avsevärt tiden för felsökningar och tillåter analys av varje tillagd faktors bidrag på slutresultatet.

2. Formula Student Underlag

2.1 Beskrivning av de Dynamiska Tävlingsmoment

För att kunna dimensionera den elektriska drivlinan är det viktigt att ta hänsyn till de dynamiska tävlingsgrenarna, då det är under dessa grenar som bilen körs och utsätts för slitage samt påfrestningar på konstruktionen. De utgör även den största delen av Formula Student tävlingen och det är därför viktigt att veta att drivlinan klarar av att förse Formula-bilens totala energibehov under Endurance, som är det mest energikrävande tävlingsmomentet.

2.1.1 Acceleration

Tävlingsmomentet Acceleration, går ut på att bedöma Formula Student-bilens acceleration på en 75 m lång sträcka på plant underlag. Tävlingen genomförs i två omgångar, där varje omgång måste ha olika förare och där varje förare har två försök vardera. Poängsättningen för denna gren bygger på den tid det tar för bilen att ta sig från startlinjen till mållinjen och ger mellan 0 till 75 poäng [7]. För att beräkna poängen används (2.1).

$$Accelerations\ poäng = 71{,}5 \cdot \frac{\left(\frac{t_{max}}{t_{din}}\right)-1}{\left(\frac{t_{max}}{t_{min}}\right)-1} + 3{,}5 \qquad (2.1)$$

t_{din} bästa tiden för laget

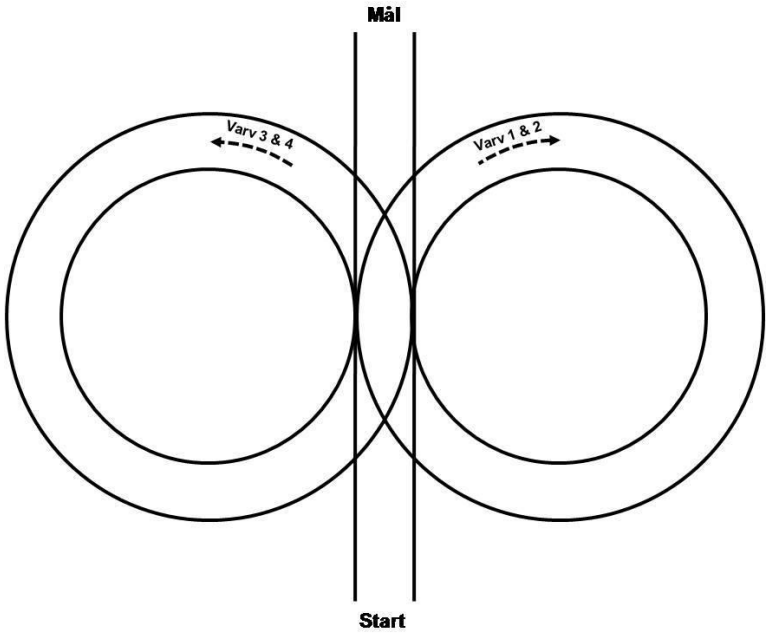
t_{min} tiden för det snabbaste laget

t_{max} 150 % av t_{min}

Som ekvationen visar så påverkar motståndarnas tider lagets poäng, därför är det viktigt med en snabb och lätt Formula-bil för att få så många poäng som möjligt.

2.1.2 Skidpad- loppet

Syftet med Skidpad är att testa och mäta bilens kurvtagningsförmåga på plant väglag vid konstant kurvtagning i form av en cirkel [7]. I figur 2.1 visas en bild på banan och hur Formula-bilarna kör. Då projektet inte beaktar kurvtagningar och den fordonsdynamik som tillhör detta, kommer inte drivlinan försöka optimeras efter kraven på en Formula-bil för genomförandet av detta tävlingsmoment.



Figur 2.1 - Överblick av banan

Skidpad genomförs i två omgångar med två olika förare som två försök vardera. Poängsättningen för Skidpad grundar sig i kapaciteten för bilens lateralacceleration och påverkas även utav den snabbaste bilens tid. Nedanstående ekvation används när man ska beräkna poängen vid Skidpad tävlingen. Viktiga parametrar för Skidpad som bör tas hänsyn till vid design och dimensionering av Formula Student-bilen är att bilen är lätt, snabb och lättmanövrerad [7].

$$Skidpad\ poäng = 47{,}5 \cdot \frac{\left(\frac{t_{max}}{t_{din}}\right)^2 - 1}{\left(\frac{t_{max}}{t_{min}}\right)^2 - 1} + 2{,}5 \qquad (2.2)$$

t_{din} medelvärdet av tiden för vänster- och högervarvet av lagets bästa körning

t_{min} tiden för det snabbaste laget

t_{max} 125 % av t_{min}

2.1.3 Autocross

Autocross-momentet är ett sprintlopp där Formula-bilens manövrerbarhet testas på en snäv bana utan hinder ifrån motståndarna. Autocross sammankopplar egenskaperna av acceleration, bromsning och kurvtagningsförmågan i ett och samma lopp. Autocross genomförs av två olika förare med vardera två köromgångar. Under loppet kan det bli tillägg på lagets tid om bilen välter en kon vilket ger 2 sekunders tidspålägg, kör utanför banan resulterar i 20 sekunders tillägg eller om en slalomport missas. Vid poängsättningen användas nedanstående ekvation [7].

$$Autocross\ poäng = 142{,}5 \cdot \frac{\left(\frac{t_{max}}{t_{din}}\right)-1}{\left(\frac{t_{max}}{t_{min}}\right)-1} + 7{,}5 \qquad (2.3)$$

t_{din} den lägsta tiden inklusive straffpålägg i något av lagets köromgångar

t_{min} den lägsta korrigerade och registrerade tiden av alla tävlingsdeltagare

t_{max} 145 % av t_{min}

2.1.4 Endurance inklusive Efficiency

Endurance är det största och viktigaste momentet inom de dynamiska tävlingsgrenarna vilket också är projektets fokus. Endurance är uppbyggt för att testa bilarnas övergripande prestanda och uthållighet. I samband med tävlingen mäts Formula-bilarnas effektivitet och detta är viktigt i många fordonstävlingar för att veta hur bra bilen är justerad för tävlingen. Poängsättningen för uthållighetsloppet och bilens effektivitet beräknas ifrån samma omgång [7].

Endurance utförs med en omgång på 22 km där alla lagens bilar tävlar mot varandra. Under tävlingen är det inte tillåtet att arbeta på Formula-bilen vilket resulterar i höga krav för att slutföra loppet. Under tävlingen mäts varje enskilt lags tid per varv för sedan summeras inför poängbedömningen, även här kan tillägg på tiden göras. Poängen för Endurance sätts enligt (2.4) [7].

$$Endurance\ poäng = 250 \cdot \frac{\left(\frac{t_{max}}{t_{din}}\right)-1}{\left(\frac{t_{max}}{t_{min}}\right)-1} + 50 \qquad (2.4)$$

t_{din} summan av lagets samtliga varvtider för delmomentet

t_{min} lägsta tiden av det snabbaste lagets tid

t_{max} 145% av t_{min}

Om lagets tid är större än t_{max} ger det poängen 0, detta gäller enbart för momentet Endurance.

Efficiency är ett delmoment i grenen Endurance, denna syftar till att mäta Formula-bilens bränsleeffektivitet. Genomsnittsförbrukningen av bränsle eller energi (vid användning av alternativa energikällor) beräknas och poängsätts till ett värde av maximalt 100 poäng, detta poäng är likt de andra poängsättningarna beroende på motståndarlagens prestationer [7].

2.2 Beskrivning av Chalmers Formula Student bilen

Figur 2.2 - Typisk Chalmers Formula Student-bil utrustad med aerodynamiskt-paket [8].

Chalmers Formula Student-bilen för år 2012 är unik jämfört tidigare Formula-bilar byggda under Chalmers Formula Student-projektet då detta var den första bilen utrustat med ett aerodynamiskt-paket, en Formula-bil utrustad med aerodynamiskt-paket illustreras i figur 2.2 [8]. Anledningen till installationen av detta paket är att det skapar en så kallad nedkraft, denna tillåter att Formula-bilen kan utnyttjas effektivare i kurvorna och till viss del på raksträckorna. Nedkraft kan liknas med en virtuell viktökning, detta pressar ner bilen mot banan och ökar det tillgängliga greppet mellan däcken och underlaget, därav möjliggörs högre kurvtagningshastigheter [9]. Formula-bilen ifrån 2012 var bensindriven och blev det årets vinnare i Formula Student tävlingen på Silverstone. Vikten för bilen hamnade på 237 kg utan förare vilket var högre än medelvärdet på vikten hos tidigare Chalmers Formula Student-bilar som hade ett medelvärde på 224 kg [8].

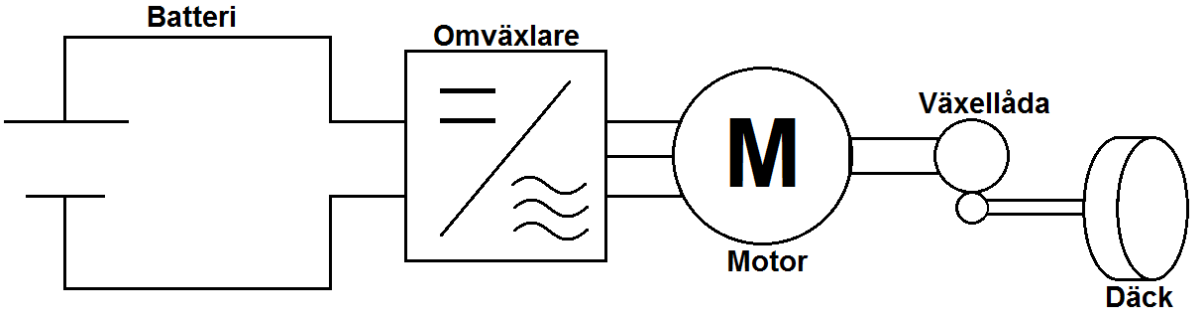
Anledningen att denna bil används är att den anses bäst lämpad, i jämförelse med de andra bilarna då den genererade ett bättre slutresultat i form av en vinst vid Silverstone och då tillgänglig mätdata för denna tävling är av god kvalité. Kördatan ifrån bilen kan användas, trots att bilen som projektet syftar till att dimensionera endast skall vara elektriskt driven, detta på grund av att fordonsdynamiken är relativt likartad bilarna emellan. Chalmers Formula Student-bil 2015 kommer att vara helt elektriskt med två motorer där den totala vikten förväntas ligga på 195 kg utan förare vilket kommer resultera i en antagen totalvikt på 270 kg. Två permanent magnetiserade synkron motorer, PMSM, står för driften av denna Formula-bil.

2.3 Loggad data från Silverstone 2012

Kördatan som använts har tagits från tävlingen i Silverstone 2012 av CFS2012 bilen. Genom programvaran Race technology har GPS värden från tävlingen analyserats där grafer skapats på hastighet, sträcka och retardation, detta för modellerandet utav projektets simulerade bil.

Race Technology är en programvara som samlar information från flertalet komponenter i fordonet, så som varvtal och effekter, och tillika registreras position och tider, detta utförs via GPS, samt sändare monterade i bilen. I programmet kan även simuleringar köras och diagram av olika slag kan skapas av data [10].

3. Elektrisk drivlina



Figur 3.1 - Illustration av elektrisk drivlina

En drivlina är de delar som står för driften av bilen, alltså alla komponenter som står för driften av bilen, från energikällan till däcken, vilket illustreras i figur 3.1. I en elektrisk drivlina inkluderar detta motor, växellåda, kraftelektronik och batterier. De delar som valdes för dimensionering var motor och batteri [11].

3.1 Motor

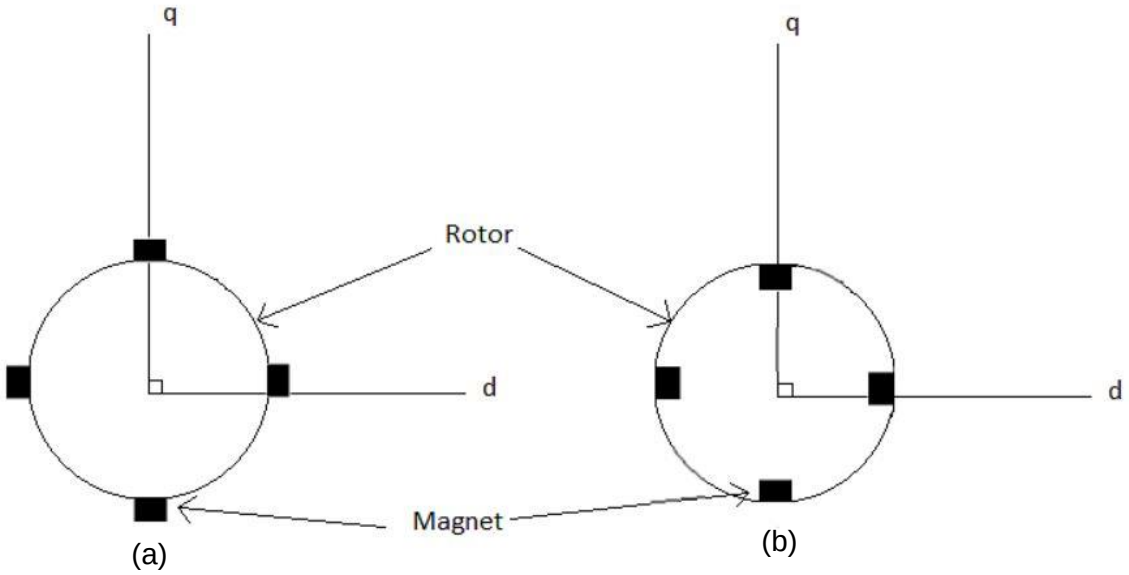
Parametrarna som undersöks för att optimera motorn är spänning, maximal spänning som batteri kan ge ut, maximalt kraftmoment och topphastighet. Dessa är parametrar som måste väljas inför dimensionering av motorn, försummelse av dessa kan komma att leda till otillräcklig prestanda för slutförande av Endurance. Alla tidigare nämnda parametrar kommer att väljas i enlighet med Formula Students regelverk.

I optimeringssyfte i detta projekt har Permanent Magnetiserad Synkron Motor, PMSM, valts att studeras. Valet att arbeta gentemot enbart en typ av elektrisk motor baseras på ett antal grunder. Främsta anledningen till denna begränsning är att Chalmers Formula Student 2015 har valt att utnyttja denna motortyp för driften av sin Formula-bil. Utav Chalmers Formula Student gjordes detta val på grunderna att detta var en motor de med enkelhet hade tillgång till vid begynnelsen utav CFS2015-projektet. Vidare ansågs det i och med tidsbristen gällandes modellerande av drivlinan, att det hade varit alltför tidskrävande att designa simuleringsmodellen på ett tillräckligt universellt sätt för att med enkelhet kunna implementera olika motormodeller.

PMSM karakteriseras av sinusformade vågor på det inducerade elektromagnetiska fältet. Denna motortyp används bland annat där effektbehovet är stort då den besitter egenskaper som hög effekt per volymenhet och god accelerationsförmåga [12].

Ingående komponenter i PMSM är stator, rotor och permanentmagneter. På statorn finns det spår som är försedda med lindningar av koppartråd och sitter fasförskjutna i förhållande till varandra. När lindningarna magnetiseras skapas ett magnetfält som får rotorn att rotera. Det finns generellt två typer av PMSM som klassificeras beroende på huruvida permanentmagneterna är placerade på rotorns yta (Surface-PMSM), eller på dess insida (interior-PMSM), illustrerat i figur 3.2. I fallet då

magneterna är placerade på rotorns yta lämpar sig konstruktionen för låghastighetsapplikationer. För höghastighetsapplikationer lämpar sig däremot konstruktionen då magneterna är placerade på rotorns insida [12]. Konstruktionen är då mer robust och kan stå emot krafterna som uppstår i samband med en högre centripetalacceleration än den upplevd vid låghastighetsapplikationer.



Figur 3.2 - Illustration av Surface (a)- och Interior-PMSM (b) rotorer med magnetplacering

Matematiskt kan PMSM beskrivas som en ekvivalent 2-fas maskin i ett referenssystem som roterar med rotorn [12]. Detta ger att spänningarna och strömmarna blir konstanta vid stationärdrift av motorn. I detta referenssystem är d-axeln orienterad utefter rotorns nordpol och q-axeln är vinkelrät mot d-axeln. I det roterande referenssystem kan den elektriska delen av motorn beskrivas enligt (3.1), (3.2). och momentet enligt (3.3), det bör här tilläggas att rotorn används som referens i dessa ekvationer [12].

$$\frac{d}{dt}i_d = \frac{1}{L_d}V_d - \frac{R}{L_d}i_d + \frac{L_q}{L_d}p\omega_m i_q \tag{3.1}$$

$$\frac{d}{dt}i_q = \frac{1}{L_q}V_q - \frac{R}{L_q}i_d + \frac{L_d}{L_q}p\omega_m i_d - \frac{\lambda p\omega_m}{L_q} \tag{3.2}$$

$$T_e = 1.5p[\lambda i_q + (L_d + L_q)i_d i_q] \tag{3.3}$$

L_q, L_d q och d axel-induktanser

R Statorns Resistans

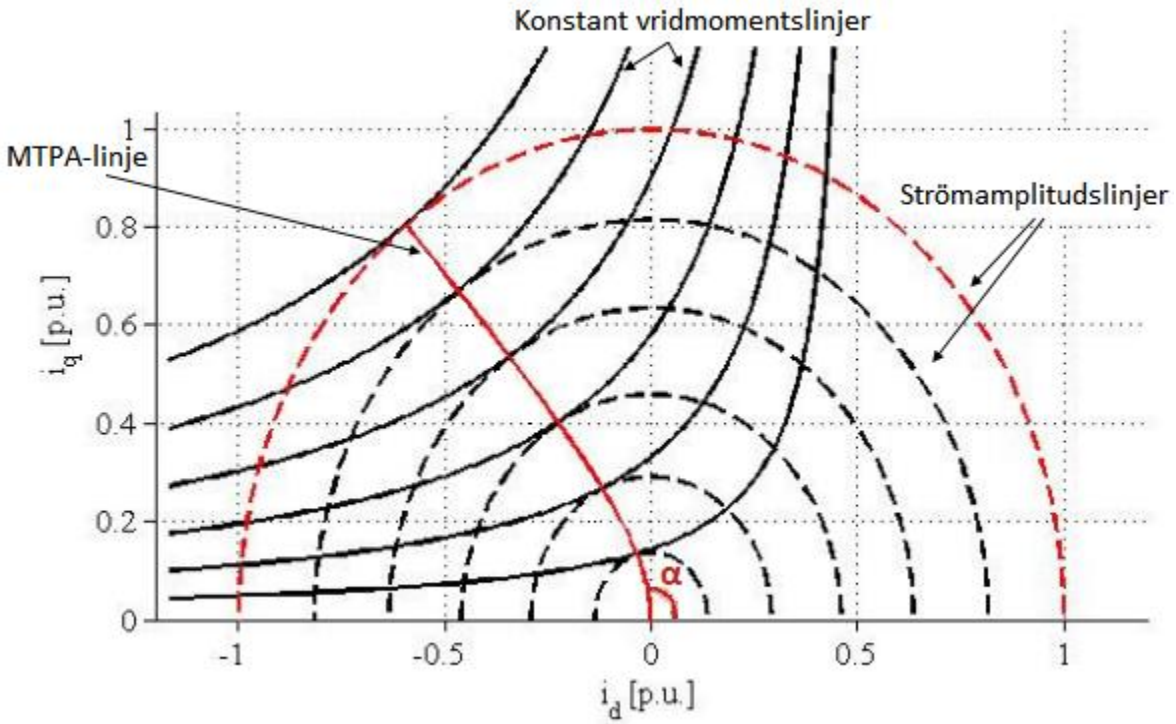
i_q, i_d q och d axel-strömmar

v_q, v_d	q och d axel-spänningar
m	vinkelhastighet för rotorn
λ	Inducerad flöde amplitud av permanent magneterna
p	Antal polpar
Te	Elektromagnetisk moment

I (3.3) finns två okända parametrar, i_d och i_q, dessa kan genom MTPA-härledning (Maximalt vridmoment per Ampere) beskriva strömmen i maskinen som uttrycket

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = l_m \begin{bmatrix} \cos\alpha \\ \sin\alpha \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

där I_m är amplituden och α är den vinkel mellan i_d och i_q som närmast anses överensstämma med den kurva som visar var högst vridmoment uppnås till lägst strömamplitud enligt figur 3.3. Härledning för hur omvandlingen sker finns beskriven under bilaga A.

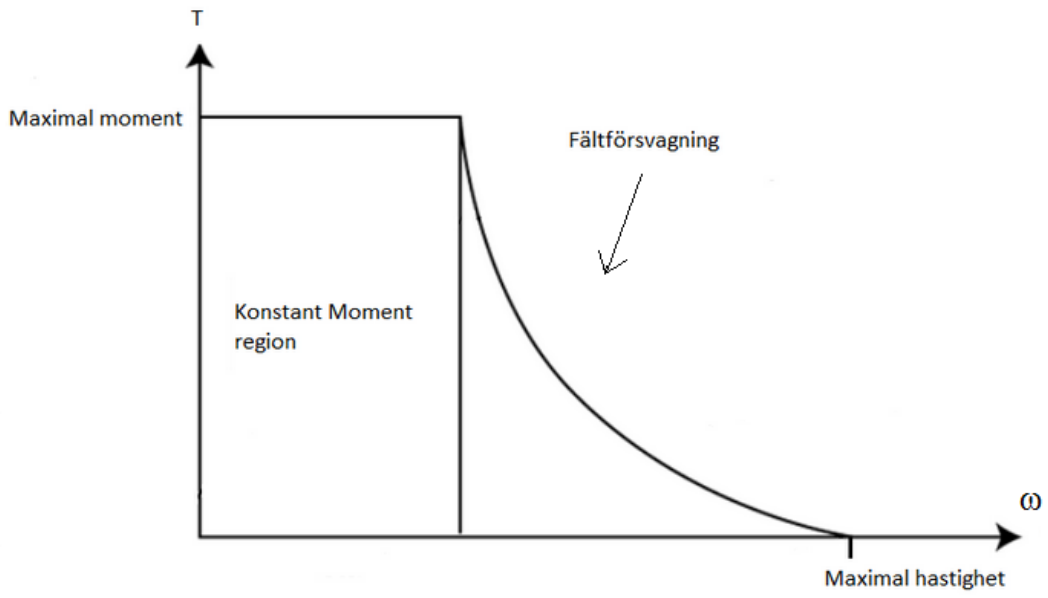


Figur 3.3 - Ett exempel på hur vridmomentet beror på i_d och i_q samt strömamplituden av dessa.

PMSM har egenskapen att kunna leverera ett konstant moment upp till en viss hastighet och inom denna region är maximalt moment möjligt att uppnå. Vid hastigheter utanför denna region minskar det maximalt möjliga momentet, detta kallas fältförsvagning som visas i figur 3.4. PMSM motorn får en begränsad inspänning och ström på grund av växelomriktaren, där en övre gräns placeras på den tillgängliga märkspänningen och märkströmmen. Motorns ström- och

spänningsgränser påverkar den maximala hastigheten och det maximala vridmomentet som kan levereras ifrån motorns drivsystem [12].

När maskinen uppgår till den maximala märkspänningen och därigenom den maximala tillförda spänningen och märkmomentet uppnår maskinen en hastighet som kallas märkhastighet. Över denna hastighet så ökar det inducerade elektromagnetiska fältet som då kommer att passera den maximala inspänningen som då resulterar i en sänkning av strömflödet och möjligheten att leverera en högre ström. Fältförsvagning innebär att det inducerade elektromagnetiska fältet begränsas till att vara lägre än den pålagda spänningen. Fältförsvagning är omvänt proportionell mot statorns frekvens vilket resulterar i att det inducerade elektromagnetiska fältet är konstant och inte ökar med ökande hastighet [12].



Figur 3.4 - Moment-hastighet karakteristik inklusive fältförsvagning för en PMSM motor

3.2 Batterier

Under dem senaste åren har forskning på batteri avseende driften av el- och hybridfordon ökat, flera olika sorters laddningsbara batteri har i detta syfte övervägts [13]. Viktiga parametrar som måste studera för att kunna välja rätt batteri är vikt, energidensitet, energiförbrukning, maximal urladdningsström och säkerhet. För en Formula-bil är det viktigt med en låg totalvikt för den kompletta bilen, vilket gör att det krävs en hög energidensitet på batteriet, då detta är ett stort viktbidrag, samtidigt som batteriet i sig krävs leverera tillräcklig effekt för att uppnå önskade hastigheter på bilen under längre tider. Graden till vilket detta uppnås påverkar direkt möjligheten till att erhålla höga poäng i Endurance som är den största dynamiska tävlingsgrenen. Genom att studera den specifika energiförbrukningen [Wh/kg] kan batteriets totala vikt beräknas och ur den maximala urladdningsströmmen kan den totala effekten beräknas som batteriet kan leverera [14].

I laddningsbara batterier används olika material på anoden och katoden samt elektrolyten i battericellen och det resulterar i varierande egenskaper för diverse batterityper [15]. Genom att jämföra batteriers energitäthet, energidensitet och cellspänning blir det lättare att välja material på batteriet vilket visas i tabell 3.1. För Formula Student-bilen är det som tidigare nämnt viktigt med en hög energidensitet för att få en så låg vikt som möjligt och därför är blybatteri inte värt att studera mer djupgående på grund av dess låga energitäthet vilket visas i tabell 3.1.

Tabell 3.1 - energitätheten och cellspänningen för dem vanligaste batterityperna [16][17].

Material	Nickel/metall hybrid (Ni-MH)	Litium Kobolt ($LiCoO_2$)	Litium järn fosfat ($LiFePO_4$)	Bly (Pb)
energitäthet [Wh/kg]	80-120	190-200	120-130	20-30
energidensitet [Wh/L]	200-280	190-400	140-350	30-50
cellspänning [v]	1,2	3,7	3,2	2

3.2.1 Nickel/metall-hybridbatteri (Ni-MH)

Nickel/metall-hybridbatteri används främst i hybridbilar men var även tidigare ett alternativ för elbilar. Ni-MH-batterier ersätter NiCid-batterier och skillnaden mellan dessa batterier är att Ni-MH's negativa elektrod består av en metall-hybrid som används för att binda väte [18].

Fördelar med ett nickel/metall-hybridbatteri är att det har bra transportförmåga av elektrisk laddning gentemot elektrolyterna i litiumbatterier. Det sker även sidoreaktioner i batteriet som skyddar från överladdningen som bidrar till en kapacitansbalans [18]. I slutet på en laddning kan syre bildas vid de närvarande potentialerna hos den positiva elektroden och syret diffunderar sedan under transport till den negativa elektroden där de rekombinerar. Säkerheten i ett nickel/metall-hybrid batteri är förhållandevis hög då batteriets elektrolyt är vattenbaserat vilket resulterar i att det inte kan ske någon antändning vid en kortslutning [18].

Nackdelar med ett nickel/metall-hybridbatteri är att cellen blir uttorkad då det blir en vattenbrist i elektrolyten samt att metall-hybriden bryts ner under användning. Batteriet har en kortare livslängd i jämförelse med litiumbatterier på 500 cykler och blir därför dyrare [18]. Som kan ses i tabell 3.1 är energidensiteten också lägre jämfört med litiumbatteri vilket resulterar i en högre vikt på batteriet.

3.2.2 Litium jon batterier (li-ion)

Litium jon batterierna är de vanligaste och mest lovande batteri-alternativen i elbilar och de dominerar elbilsmarknaden [18]. Litium jon batterier är ett samlingsnamn på en grupp batterier där energin erhålls genom att litiumjoner rör sig mellan elektroderna [19]. De introducerades på marknaden 1991 av företaget Sony. Ett

Litium-jon-batteri består av en anod (negativa elektroden), katod (positiva elektroden) och elektrolyt. Grafit är det vanligaste anodmaterialet och katoden består av ett material med öppen struktur som tillåter avlägsning och upptag av litiumjoner. Val av katodmaterial är en av de viktigaste faktorerna när ett batteri designas. Batteriets namn avslöjar vilket katodmaterial som används [16][17]. Nedan presenteras olika typer av litium jon batterier.

Litium-kobolt är ett av de vanligaste katodmaterial i bruk idag, men materialet är dyrt och har stora säkerhetsrisker. Riskerna med batteriet är att det kan skadas om det laddas upp eller ur för kraftigt och om batteriet laddas upp för mycket kan det börja brinna. För att se till att batteriet inte laddas upp för mycket krävs ett battriövervakningssystem. Fördelar med $LiCoO_2$ är att det har en hög energitäthet och energidensitet vilket visas i tabell 3.1 samt att den kan hantera fler än 1000 uppladdningar [18].

Litium-järnfosfat är billigare och har mindre säkerhetsrisker än litium-kobolt, samt att materialet är lätt att framställa. Nackdelen med ett $LiFePO_4$ batteri är att det har en låg konduktivitet men genom dopning, som innebär att elektronparbindningen störs så att det blir en elektron över per tillsatt störämnesatom, undviks detta problemet och konduktiviteten ökar. Energitätheten och energidensiteten är något lägre än litium kobolt se tabell 3.1 [18].

3.3 Växelomriktaren

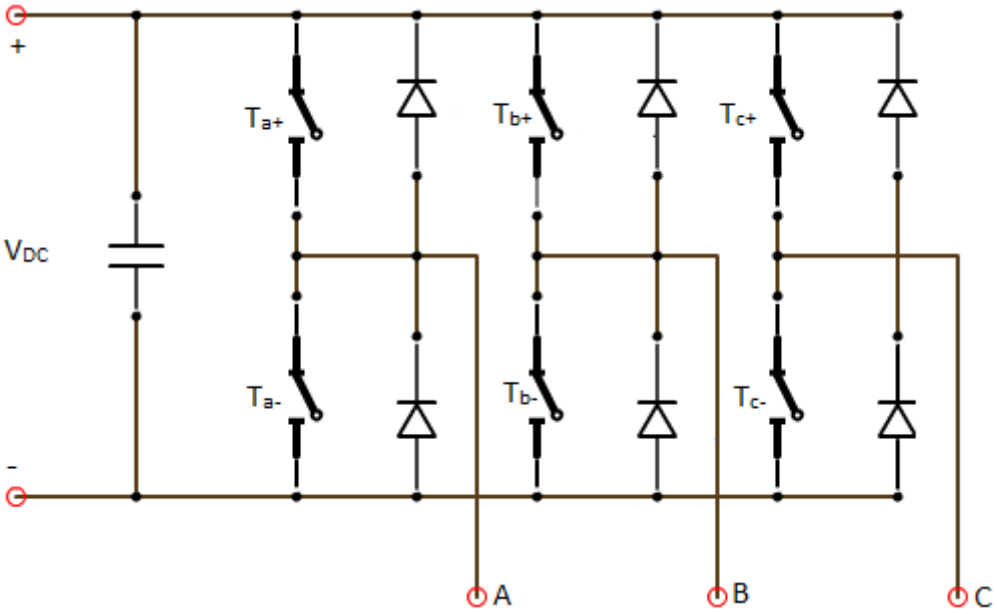
Kraftelektronik används för att ha möjlighet att förändra egenskaperna hos elektrisk energi så som att omvandla växelspänning till likspänning, höja och sänka spänningar eller förändra frekvenser. Förlusterna i kraftelektroniska komponenter är relativt små, verkningsgraden brukar i regel ligga runt 97-99% [20].

En växelomriktare används för att omvandla likspänning från till exempel ett batteri till växelspänning. Ofta används detta för att kunna driva växelströmsmaskiner så som PMSM- eller asynkronmotorn med variabla varvtal, vilket är möjligt genom att med hjälp av växelomriktaren ändra frekvensen på spänningen. Det är även möjligt att ändra spänningens amplitud för att på så sätt variera den magnetiska flödestätheten [20].

För att få en sinusformad spänning från en liksspänningskälla så divideras den önskade utspänningen med den tillgängliga likspänningen, vilket illustreras av V_{DC} i figur 3.7. Det som fås fram är en pulskvot som i sin tur styr en modulator som genererar styrsignalerna till transistorerna i omriktaren, $T_{a+/-}$, $T_{b+/-}$ och $T_{c+/-}$.För att växelomriktaren skall fungera tillfredställande krävs att modulationsfrekvensen är mycket större än den växelspänning som ska skapas. Spänningens toppvärde fås genom multiplikation med √2 och huvudspänningen i sin tur fås genom att multiplicera absolutbeloppet med √3 vilket ger V_{dc}. Omskrivet fås uttrycket

$$|Vs_{max}| = \frac{V_{dc}}{\sqrt{6}} \tag{3.5}$$

Genom att längden på pulserna från transistorerna varieras så bildas ut från växelriktaren tre olika sinusfaser, A, B och C med en fasförskjutning på 120°. Ändras frekvensen på styrsignalen så kommer även utspänningens frekvens ändras, detta gäller även för amplituden[20][21].



Figur 3.7 - Illustration av ett kretsschema över en trefasomriktare

4. Fordonsdynamik

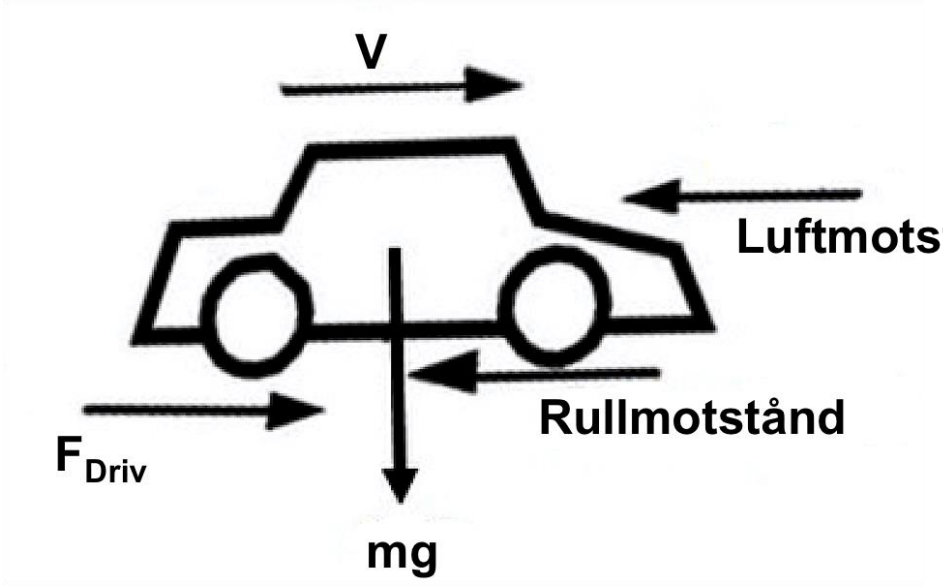
Dimensionering av en drivlina på bästa sätt kräver en analys av fordonsdynamik, i form av rörelsemönster samt krafter som verkar på fordonet. Vid analys av fordonsdynamik delas i regel krafterna upp i tre områden, longitudinell-, vertikal- och sidorörelse (lateral). Dessa illustreras med hjälp av ett koordinatsystem enligt figur (4.1). Formula-bilens framåtrörelse som är den longitudinella rörelsen beskrivs av den positiva x-axeln samtidigt som y-axeln är lateralrörelsen och z-axeln är den vertikala rörelsen, detta enligt ISO (Internationella Standard Organisationen) [22][23].

Figur 4.1 - Formula Student-bil med koordinatsystemet som används i fordonsdynamiska syften [8].

För beräkning och simulering av Formula-bilens dynamik så som acceleration och retardation finns det tre olika modeller; en-, två- eller fyr-hjulsmodell. Krafterna på Formula-bilen vid små förflyttningar i sidled på raksträckor så som vid omkörningar, och filbytet sker endast under en väldigt kort tid och resulterar i en liten inverkan på fordonsdynamiken. Detta jämfört med krafterna som förflyttar bilen framåt, av denna anledning är det även möjligt att avgränsa lateralrörelserna hos bilen på raksträckorna [24].

Simulerandet av fordonsdynamiken och dimensioneringen av den elektriska drivlinan i Formula Student-bilen använder sig i detta projekt utav en två-hjulsmodell. Här tas hänsyn till de longitudinella krafterna då lateral- och vertikalkrafterna avgränsas. De laterala krafterna avgränsas genom antagandet som tidigare presenterats, att hastigheten som uppmättes hos CFS2012-bilen i kurvorna är den högsta möjliga hastighet med vilken kurvorna kan genomföras utan tidsförluster. Genom att göra detta elimineras behovet av att ta hänsyn till lateralrörelser av hela Formula-bilen då dessa är som mest framstående vid kurvtagning. Vertikalrörelser hos bilen som resultat av lutning på banan ges ingen hänsyn då Silverstone på vilken Formula-bilarna framförs anses vara plan, och ingen förflyttning i höjdled kommer således att behöva betraktas. I en longitudinell fordonsdynamiksmodell är det tyngdkraften,

luftmotståndet, longitudinella däckkraften och rullmotståndet som analyseras [25]. I figur 4.2 illustreras krafternas riktning på bilen.



Figur 4.2 - Riktning på krafter som verkar på en bil vid longitudinell rörelse

Två-hjulsmodellen och Formula-bilens acceleration bygger på (4.1). Där F_{Driv} är kraften som driver bilen framåt, $F_{luftmotstånd}$ är kraften som inverkar på bilen ifrån luftmotståndet och R_x är rullmotståndskraften på däcken.

$$ma = F_{Driv} - F_{luftmotstånd} - R_x \tag{4.1}$$

4.1 Luftmotstånd

Luftmotstånd är den bromsande kraften på bilen i den longitudinella riktningen. Storleken på kraften beror på väderförhållandet så som luftens temperatur och barometertrycket, vilket sammanslaget representeras av luftdensiteten [25]. Luftmotståndet beskrivs enligt:

$$F_{luft} = \frac{1}{2}\rho C_d A_f (V_x + V_{vind})^2 \tag{4.2}$$

Där ρ är luftdensiteten, C_d är luftmotståndskoefficienten, A_f är bilens frontalarea, V_x är den longitudinella hastigheten för bilen och $V_{Vind\ är}$ Vindhastigheten, som generar i (4.2), positivt (+) bidrag om motvind och negativt (-) om medvind. Vid beräkning av luftmotståndet brukar standardiserade förhållande användas där temperaturen är 15°c och där barometertrycket är 101,32 kPa vilket resulterar i att luftdensiteten ρ blir 1,225 kg/ m^3 [25].

4.2 Longitudinella däckkraften

Den longitudinella däckkraften beror på friktionskraften som verkar mellan marken och däcket och kan ses som två krafter; en för framdäcket F_{xf} samt en för bakdäcket F_{xb}. Den longitudinella däckkraften uppkommer på grund av däckets slip-ratio, normalkraften på däcket och friktionskoefficienten mellan däcket och underlaget [25]. Normalbelastningen på däcket genereras ifrån den vertikala kraften på däcket som kommer från vikten av fordonet, placeringen av tyngdpunkten längsgående, den longitudinella accelerationen och luftmotståndskrafterna.

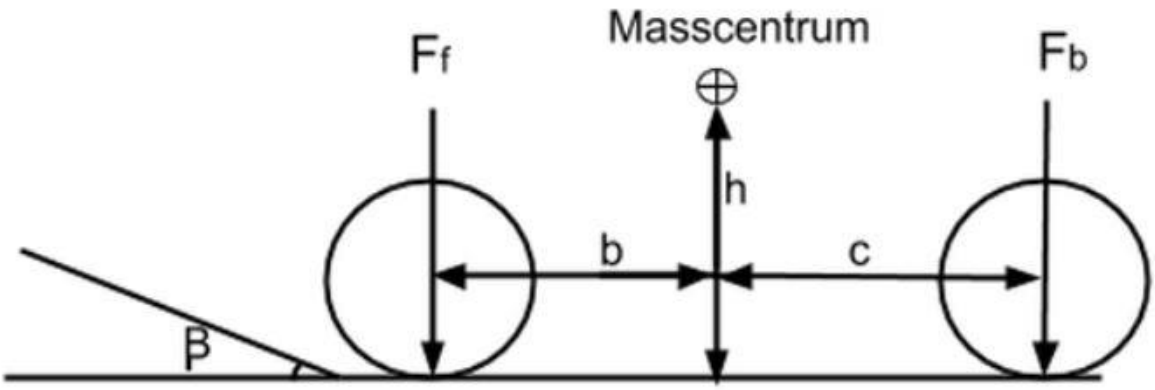
4.2.1 Viktförskjutning

När en bil exempelvis befinner sig i sin accelerations- eller retardationsfas sker en viktförskjutning som förändrar normalkraftfördelningen på fram- och bakaxeln. Parametrar som påverkar detta ingår i bilens konstruktionsparametrar så som luftmotstånd och acceleration (samt retardation) som bilen kropp utsätts för. Detta beskrivs i (4.3), samt (4.4) och illustreras i figur 4.3 [23].

$$F_f = \frac{-h\left(F_{luft} + mgsin(\beta) + ma\right) + cmgcos(\beta)}{n(b+c)} \tag{4.3}$$

$$F_b = \frac{h\left(F_{luft} + mgsin(\beta) + ma\right) + bmgcos(\beta)}{n(b+c)} \tag{4.4}$$

h	masscentrums höjd till vägen [m]
b,c	avstånd från masscentrum till framaxeln respektive bakaxeln [m]
m	fordonets massa [kg]
a	acceleration [m/s^2]
n	antal däck per axel
β	lutningen på vägen [deg]
F_f	Normalkraften på framaxeln [N]
F_b	Normalkraften på bakaxeln [N]



Figur 4.3 – Parameterillustration för viktförskjutning

4.2.2 Slip

Kraften som uppstår mellan däckets kontaktyta och marken beskrivs med värden på däckets slip [26]. Longitudinellt slip är skillnaden mellan den longitudinella hastigheten på fordonet V_x och rotationshastigheten $r_{eff}\omega_w$ på däcket, där r_{eff} är den effektiva däckradien vid rullning och ω_w är vinkelhastigheten på däcket. Longitudinellt slip påverkas av om bilen accelererar eller bromsar och definieras enligt följande [25][26]:

$$\sigma_x = \frac{r_{eff}\omega_w - V_x}{r_{eff}\omega_w} \quad \text{vid acceleration} \tag{4.5}$$

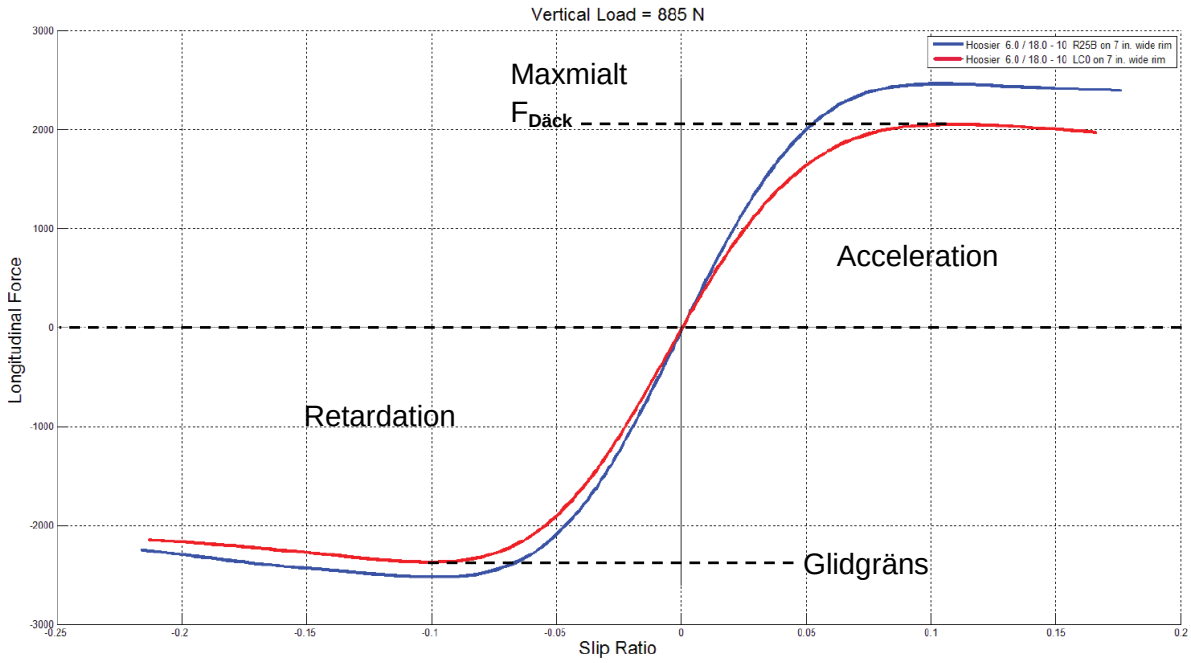
$$\sigma_x = \frac{r_{eff}\omega_w - V_x}{V_x} \quad \text{vid retardation} \tag{4.6}$$

Vid normal körning med ett torrt underlag är den longitudinella däckkraften proportionell mot däckets slip förhållande. Slip-karakteristiken ändras beroende på körningen och detta illustreras med hjälp av figur 4.5 där ett däck är under belastning av normalkraften. Den största kraften ett däck kan belastas med innan däcket börjar spinna okontrollerat är toppen på kurvan och kan även dettas ses i figur 4.5. Ett däcks slip förhållande är oftast väldigt låg vid torrt underlag, risken för att däcket spinner okontrollerat är då lågt, och med normal drift resulterar det i att den longitudinella däckkraften kan modelleras enligt (4.7) och (4.8) där $c_{\sigma f}$ och $c_{\sigma r}$ är stelhetsparametrar för fram- och bakdäck [25]. Däckkraften kan även beskrivas av normalkraften och friktionskoefficienten enligt (4.9) där är friktionskoefficient mellan väg och däck, denna är däckspecifik och varierar med normalkraftens belastning på det givna däcket [23].

$$F_{xf} = C_{\sigma f}\sigma_{xf} \quad \text{däckkraften vid framdäcket} \tag{4.7}$$

$$F_{\sigma b} = C_{\sigma b}\sigma_{xb} \quad \text{däckkraften vid bakdäcket} \tag{4.8}$$

$$F_{Däck} = \mu_{Däck}F_N \tag{4.9}$$



Figur 4.5 – Slipkurva för Hoosier LC0 (Röd)

4.3 Rullmotstånd

När däcket roterar uppstår en deformation vid kontaktytan mot vägunderlaget på grund av att däcket kan ses som elastiskt samtidigt som vägunderlaget i likhet med banan kan ses som styvt. Under rotationen kommer däckmaterialet att återgå till sin ursprungliga form när det inte längre vidrör marken och en ny kontaktyta uppstår på däcket. När materialet återgår till den ursprungliga formen kommer inte all energi som användes vid deformationen att återanvändas, detta på grund av däckets inre dämpning. Energiförlusten representerar en kraft som inverkar på bilen i motsatt körriktningen och kallas för rullmotstånd [25].

Energiförlusten resulterar ytterligare i en icke symmetrisk föredelningen av den normala däckbelastningen över kontaktytan. Vid statiskt tillstånd är fördelningen av normalkraften F_N symmetrisk med avseende på centrum av kontaktytan. Rullmotståndet brukar beskrivas genom (4.10) som är approximativt proportionell mot normalkraften där *f* är rullmotståndskoefficienten [25].

$$R_x = F_N f \tag{4.10}$$

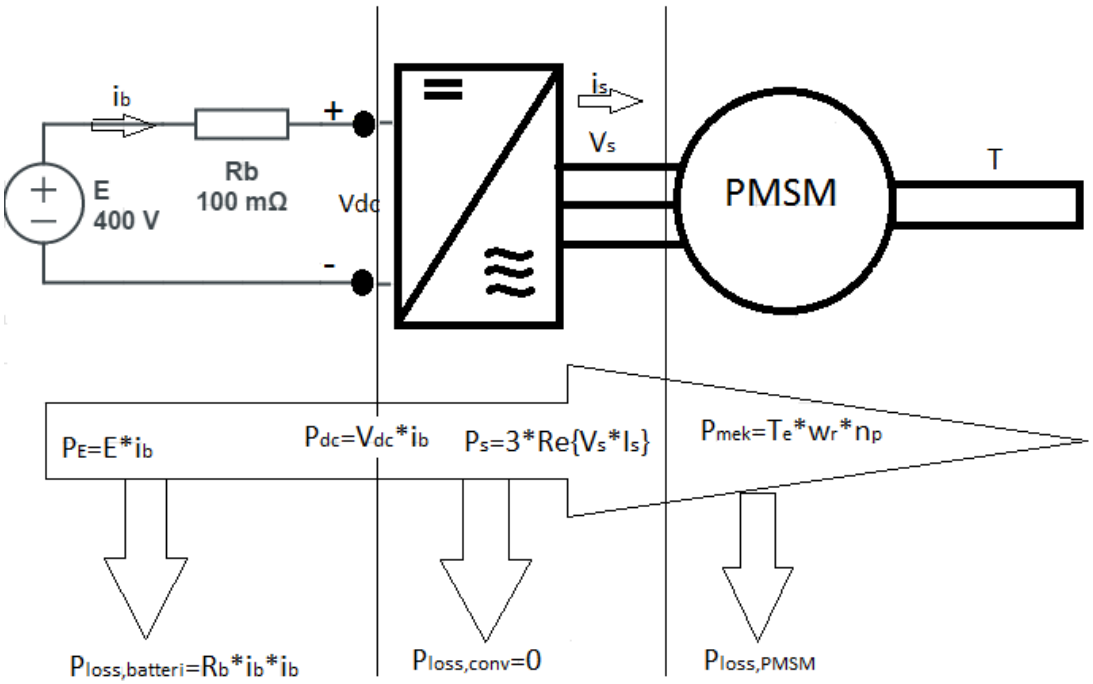
5. Simuleringsmodellen

Modellen som ligger till grund för resultatet i detta projekt baseras på en longitudinell 2-hjulsmodell där drivlinan består av en PMSM-motor med magneter på insidan av rotorn och en växellåda med fast utväxling på 8.1:1. Valet av däck är Hoosier LC0, vilket är detsamma som för CFS2015, med en diameter på 18 tum (0,4572 m) på en 7 tum (0,1778 m) bred fälg (se figur 4.5 för slipkarakteristik). Vidare används också A_f, frontal area, på 1,38 m^2 och C_d på 1,14 vilket är luftmotstånds kofficienten.

För att däcket inte ska överstiga det maximala slipet och börja spinna okontrollerat jämförs begärt vridmoment med maximalt tillåtet moment. Genom att begränsa begärt moment till maximalt tillåtna säkerställs då att däcket inte kommer att överstiga maximalt slip och börja spinna, vilket kan liknas vid ett antispinn-system. Detta görs dynamiskt och kontinuerligt där maximalt $F_{Däck}$ beräknas med hjälp av (4.9) och omvandlas till motsvarande maximalt tillåtna vridmoment som kan krävas av motorn enligt (5.1). Däckparametern $\mu_{däck}$ i (4.9) bör tillägas antas konstant med ett värde på 1,659, vilket motsvarar ungefär 70% av maximalt möjligt $\mu_{däck}$ för Hoosier LC0.

$T = \frac{F_{Däck}\, r}{K_u}$, där K_u är utväxlingen & r är däckradien (5.1)

5.1 Batterimodellen



Figur 5.1 - Effekt, spänning samt ström över batteri, växelomriktare och motor

I figur 5.1 ses ett batteri kopplat till en växelomriktare som är kopplat till en motor som har en axel. I figuren ses även strömmarnas riktning, spänningarnas placering, formler för effekterna samt förlusterna vid varje del som kommer att beskrivas samt användas vid uträkningar senare. Batteriet är modellerat på sådan sätt att spänningskällan enbart är beroende av SOC. Det finns en inre resistans i batteriet som medför ett spänningsfall.

Batteriet simuleras för att få ut värden på maximalspänningen som kan erhållas vid varje enskild tidpunkt, detta kontrolleras kontinuerligt med systemets begärda spänning för att avgöra om fältförsvagning krävs. Detta görs genom att ta fram en formel för V_{dc} och därefter beräkna State of Charge, SOC, för att slutligen ta fram maxspänningen. För att säkerställa att batteriet kan avge tillräckligt med energi för att kunna slutföra Endurance behövs även effekten P och energin för batteri modelleras, medan effekten och energin på hjulaxeln fås ur fordonsdynamiken.

Nedan följer parametrar som används vid beräkningar för batteriet:

P_{dc}	batterieffekt ut
P_e	batterieffekten
P_{mek}	effekten på hjulaxeln
V_{dc}	spänning batteriet ger ut
i_b	strömmen i batteriet
E_{soc}	batterispänningskällan
R_b	inre resistans
P_s	växelomriktareffekt
V_d, V_q,	Spänning och PMSM samt Växelomriktare
I_d, I_q	Ström från PMSM samt Växelomriktare
W_{start}	batterienergi i start
E_{batt}	batterienergi
E_{mek}	Energin på hjulaxeln
SOC	State of charge, batteriets laddningsgrad i procent

Förlusterna i växelomriktaren antas vara försumbar vilket visas i figur 5.1. Detta resulterar i att effekten för växelomriktaren och effekten som batteriet ger ut blir ekvivalent. Dessa effekter blir då lika stora och batterieffekten räknas ut enligt

$$P_{dc} = P_e - P_{loss,batteri} = V_{dc} i_b = E(SOC) i_b - R_b i_b^2 \qquad (5.2)$$

Uttryck för V_{dc} erhålls genom (5.3).

$$V_{dc} = E(SOC) - R_b i_b \tag{5.3}$$

När ett uttryck för V_{dc} är framtaget, beräknas effekten för växelomriktaren enligt 5.4 för att sedan kunna beräkna i_b

$$P_s = 3R_e\{V_s i_s\} = 3R_e\{(V_d + jV_q)(i_d + ji_q)\} = 3(V_d i_d - V_q i_q) \tag{5.4}$$

Strömmen fås fram genom att sätta P_{dc} lika med P_s vilket resulterar i (5.5).

$$i_b = \frac{3(V_{dc} i_d - V_q i_q)}{V_{dc}} \tag{5.5}$$

Strömmen i (5.5) används i (5.3) för att erhålla en formel för spänningen som kan modelleras. Sedan används pq-formeln för att erhålla V_{dc}, vilket visas i (5.6).

$$V_{dc} = \frac{E(SOC)}{2} \pm \sqrt{\left(\left(\frac{E(SOC)}{2}\right)^2 - 3R(V_d i_d - V_q i_q)\right)} \tag{5.6}$$

Då strömmen är noll, är spänningsfallet noll. Genom att sätta i_b till noll resulterar V_{dc} i E(SOC), vilket tyder på ett positivt rottecken.

Simulink beräknar V_{dc} genom att låta växelomriktaren skicka in strömmarna i_d och i_q samt spänningarna V_d och V_q till batteriet. V_{dc} räknas sedan ut genom (5.7) och utnyttjas sedan för att beräkna i_b genom (5.5).

V_{dc}, batterispänningen, som nu är framtagen kräver att SOC löses då V_{dc} är beroende av E(SOC), vilket varierar beroende på SOC. Spänningsvärden för respektive SOC-konstanter erhölls och nyttjades för simuleringarna. Konstanterna erhölls med hjälp av (5.7).

$$SOC = \left(\frac{W_{start}}{E_{batt}}\right) \cdot 100 \tag{5.7}$$

W_{start} (energiinnehållet i batteriet vid start) är maximala energin i batteriet, W fås sedan fram genom (5.8).

$$E_{batt} = W_{start} - \int E(SOC) i_b \tag{5.8}$$

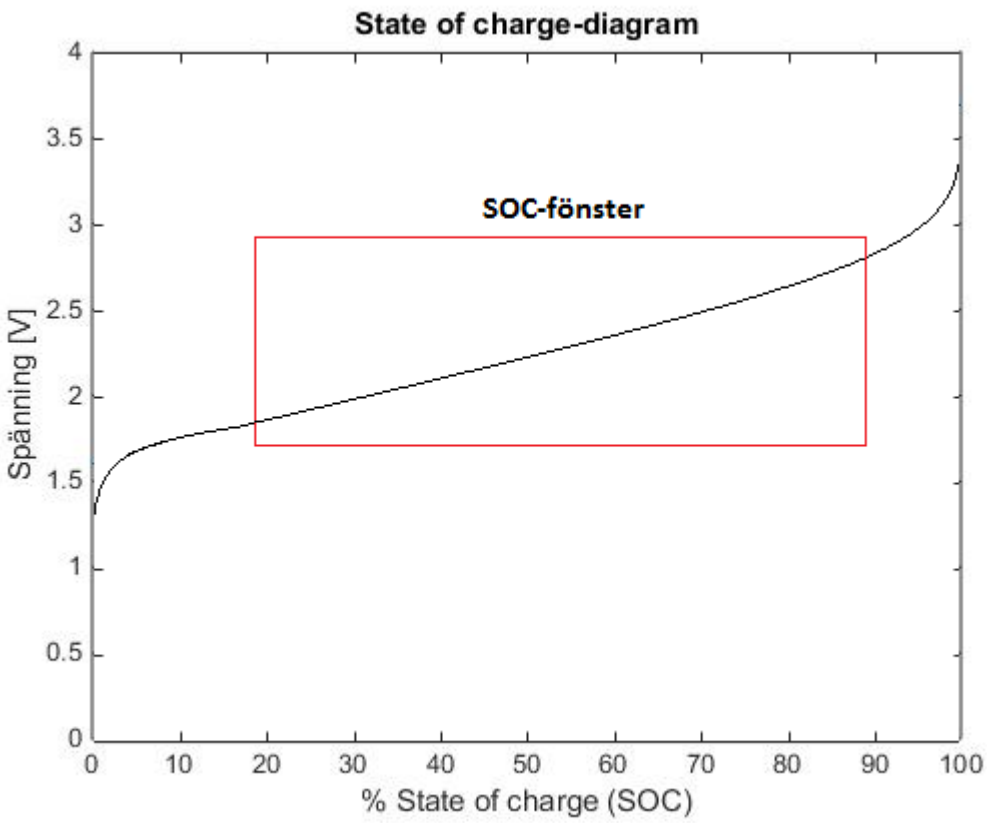
Maximala spänningen som batteriet kan leverera till systemet beräknas för att jämföras med systemets krav, behov för fältförsvagning kontrolleras därefter. Genom att jämföra denna maxspänning med spänningen systemet kräver är det då möjligt att kontrollera när systemets krav överstiger vad batteriets kapacitet, då måste fältförsvagning appliceras. Fältförsvagningen sker genom att öka strömvinkeln α, som höjer strömmen i_q och sänker strömmen i_d vilket sänker spänningsbehovet för systemet genom att ta bort den största termen i den begärda spänningen.

5.1.1 Beräkning på batteri

Av dem dynamiska tävlingsgrenarna är Endurance den gren som kräver mest energi. Det är därför viktigt att dimensionera batteriet med tillräckligt många celler för att garantera att den energi som krävs finns tillgänglig. Genom att beräkna antal celler kan energimängden från batteriet samt vikten av det totala batteriet beräknas fram.
För att kunna beräkna antal celler i ett batteri är det vissa parametrar som krävs. Regelverket för Formula Student sätter vissa begränsningar på batteriet så som att den maximala effekten ut ur batteriet, P_{max} inte får överstiga 80 kW och att den maximala spänningen över batteriet, V_{max} inte får överstiga 600 VDC [7]. Andra parametrar som krävs är cellspänningen V_c, totala kapaciteten av batteriet [Ah], maximal urladdningsström I_{max} och den kontinuerliga urladdningsströmmen/nominella strömmen I_{nom}. Dessa parametrar ges utav produktbladet för det valda batterimaterialet.

Den nominella strömmen I_{nom}, är temperaturberoende och om temperaturen överskrider temperaturgränserna som anges i produktbladet resulterar det i en lägre ström. Därför är det viktigt med bra kylsystem på både batteri men även på övriga komponenter då de avger värme till batteriomgivningen.

I elbilar menade för vardagligt bruk är det viktigt med lång hållbarhet på batteriet i form av många laddningscykler. För att ett batteri ska ha lång livstid gäller att det inte urladdas helt. Ett begrepp som brukar benämna batteriets urladdningstillstånd och laddningen vid en specifik tidpunkt kallas för State of Charge, SOC, som ofta beskrivs med hjälp av diagram. Ett generellt SOC-diagram illustreras i figur 3.6. För vanliga hybrid/elfordon är det vanligt att ett SOC-fönster på 40-50% utnyttjas. I Formula-bilen är det inte av intresse att ha många cykler eller en lång livstid, istället är det viktigt att kunna få ut så mycket energi som möjligt under en kortare tid vilket resulterar i ett SOC-fönster på 20-90%.



Figur 5.2 - Ett generellt SOC-diagram med ett SOC fönster på 20-90%

När det gäller att beräkna antal celler i batteriet finns det några olika alternativ, att endast seriekoppla cellerna, att parallellkoppla två eller tre rader av seriekopplade celler. Genom att kombinera parallell- och seriekopplade celler resulterar detta i en lägre ström som gör att effekten förblir den samma men att energin ur batteriet ökar. Beräkning av antal celler bygger på effektformeln. Formlerna för att beräkna antal celler i serie och parallellt visas i (5.9) – (5.13) där X är antal celler i serie, Y är antal celler parallellt, och Ah är den totala kapaciteten på batteriet med hänsyn taget till SOC fönstret.

$$V_{max} = 600\ [v] \tag{5.9}$$

$$V_{nom} = x \cdot V_c\ [V] \tag{5.10}$$

$$E = x \cdot V_c \cdot Ah\ [Wh] \tag{5.11}$$

$$P_{max} = x \cdot V_c \cdot I_{max}\ [W] \tag{5.12}$$

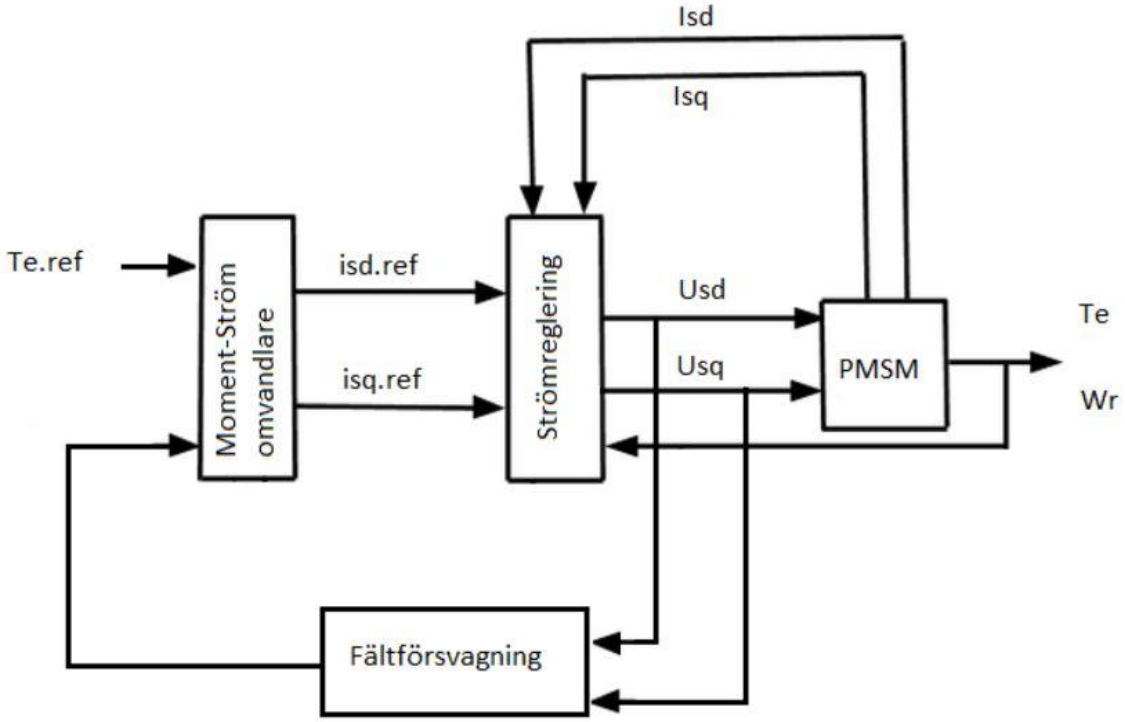
$$P_{nom} = x \cdot V_c \cdot I_{nom}\ [W] \tag{5.13}$$

För att säkerställa att Formula-Bilen kan slutföra Endurance måste energin batteriet kan leverera jämföras med energin på hjulaxeln E_{mek} om $E_{Batt} > E_{mek}$ finns det tillräckligt med energi att tillgå. Det måste även göras en jämförelse mellan effekten från batteriet P_{Batt} med effekten på hjulaxeln P_{mek} så att $P_{Batt} > P_{mek}$.

5.2 Motormodell

Enligt (3.3) och (3.4) fås ett vridmoment när en ström skickas in i motorn enligt figur 5.3. För att ta reda på vilken ström som krävs undersöks vilket vridmoment Formula-bilen kräver vid tidpunkten för undersökningen. Det krävs att något översätter en momentreferens till en ström för motormodellen, där hänsyn tas till vilken spänning batteriet har så att det finns kraft nog att driva motorn. Saknas den önskade spänningen måste modellen automatiskt fältförsvaga. Detta löses genom att jämföra begärd spänning med spänning i batteriet, saknas då spänning så måste α ökas för att andra termen i (3.3) ska minska. Detta på grund av bidraget från sinus. I sin tur minskar då T_e gentemot det begärda vridmomentet. Hänsyn krävs dessutom tas till när motorn hjälper Formula-bilen att retardera då α istället blir negativt. Modellen låter motorn retardera Formula-bilen med 30% av totalt begärt vridmoment medan resterande 70% bromsas av mekaniska bromsar implementerade i fordonsmodellen. Förhållande gällande 30% motorbromsning och 70% mekanisk bromsning grundar sig främst i att 100% motorbromsning kommer i denna modell att resultera i en låsning av bakhjulen.

Den i projektet simulerade Formula-bilen utnyttjar bakhjulsdrift, och motorbroms är därför enbart möjligt att applicera på bakhjulen. Högst tryck kommer dock att erhållas på framhjulen vid retardation på grund av viktförskjutningen framåt. Vid simulering erhölls normalkrafterna på bak- och framhjul, genom att jämföra dessa krafter antogs ett förhållande om att ca 70% utav kraften appliceras på framhjulen, medans 30% av kraften ligger på bakhjulen, se figur 6.4. På så sätt antogs att bromsdistributionen fördelas med samma förhållande som axeltrycket. I och med att ett större tryck erhålls på framhjulen kommer greppet mellan framdäck och bana öka. På så sätt är det möjligt att lägga ett större tryck på frambromsarna (större bromsverkan) utan att dessa låses då friktionen mellan däcket och banan ökat.

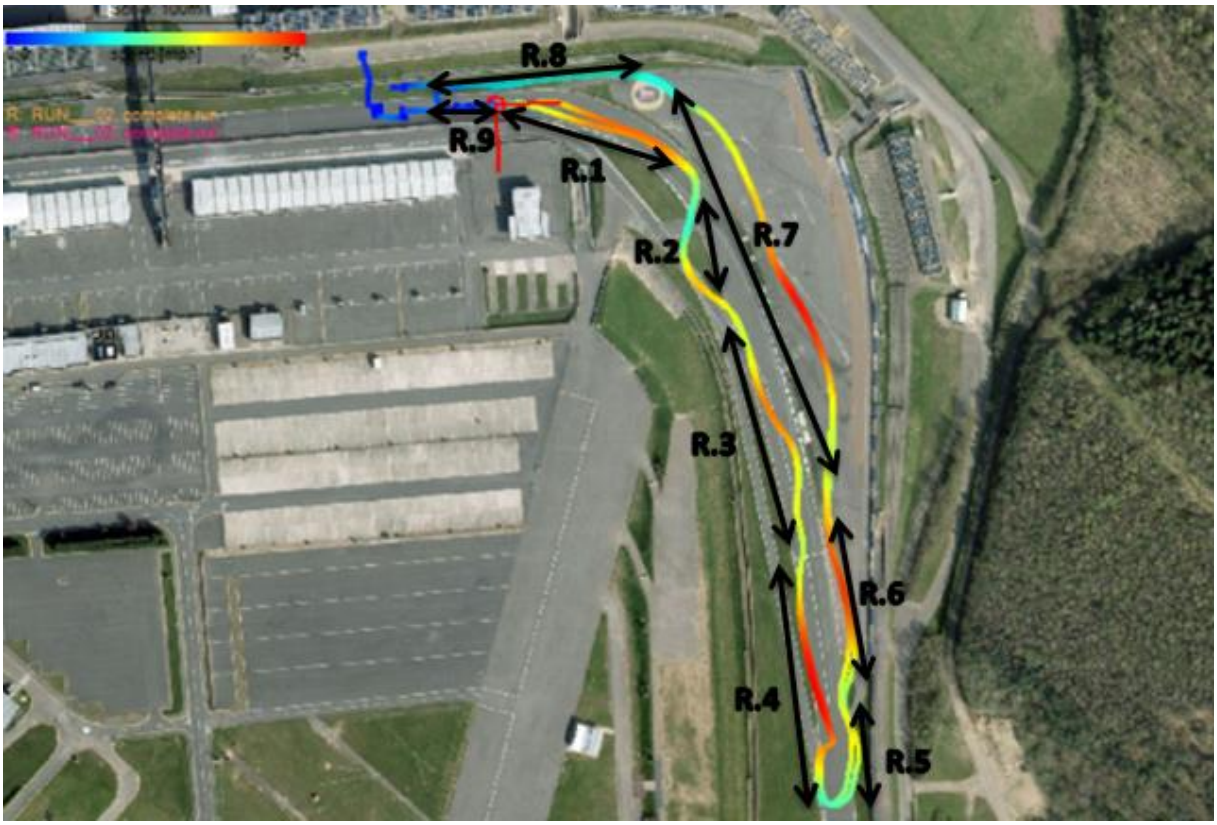


Figur 5.3 - Schematisk bild över PMSM och dess kontroller.

5.3 Kör-rutts-diagram

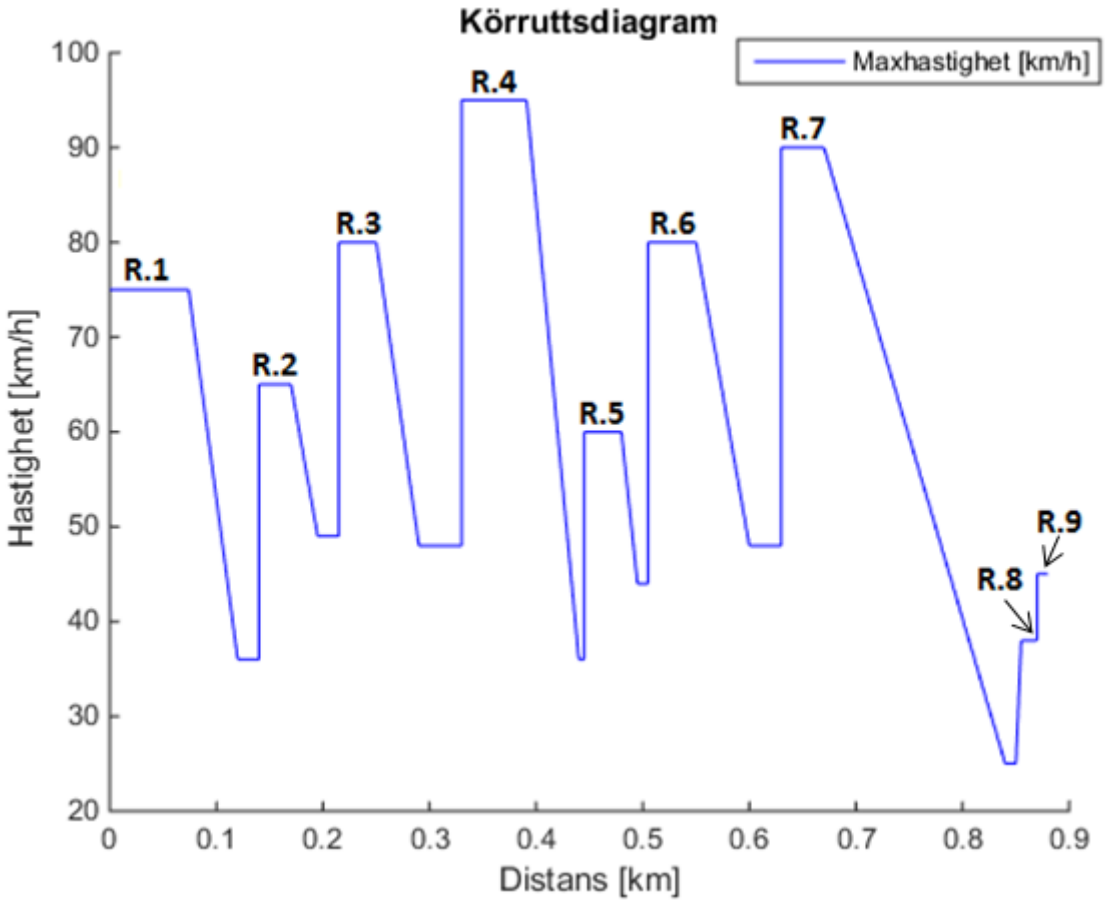
Ett kör-rutts-diagram är en åskådliggörande bild utav i detta fall ett fordons färd över en viss sträcka. Nyttan av kör-rutts-diagrammet ligger i det faktum att ett lopp som inkluderar kurvor projiceras på en axel som enbart hanterar en hastighet vid en viss distans. Kör-rutts-diagrammet i modellen bygger på två axlar, där X-axeln står för sträcka och Y-axlen för hastigheten. Då projektet har avgränsats från att iaktta kurvtagning, och valt att anta att hastigheterna uppmäta av CFS2012 är snabbast möjliga kurvtagningshastighet elimineras behovet av nya beräkningar av dessa sträckor. En åskådliggörande bild av ett fordon som färdas i en rak linje erhålls, som tar hänsyn till de inbromsningar och hastighetskarakteristiker som existerar på en bana inkluderandes kurvor.

Loppet delas upp i två olika hastighetsnivåer, den ena är maximal hastighet i kurvorna och den andra är maximal hastighet på raksträckorna, detta illustreras i figur 5.5 och figur 5.4 där R innebär raksträcka. Maximal hastighet tolkas som den hastighet Formula-bilen kan framföras i utan att erhålla okontrollerat slip. För Autocross anses Formula-bilen hålla maximal hastighet medan den i Endurance håller en något lägre genomsnittshastighet för att erhålla både goda varvtider såväl som för att säkerställa att batteriladdningen räcker för att fullfölja grenen.



Figur 5.4 - Geografisk bild med banupplägg av Silverstone inklusive geografisk illustration av de enligt projektet bedömda raksträckorna

Mätdata erhållits från tidigare Formula Student lopp utav Chalmers Formula Student vid Silverstone banan i Towcester, Northamptonshire, Storbritannien, från år 2012. Inledningsvis utnyttjades direkt överförbara kör-rutts-diagram från *Race Technology* för att mäta validiteten hos den skapade modellen. Detta gjordes genom att låta modellen försöka följa den verkliga mätdatan och jämföra kurvan med den av modellen konstruerade. Då kurvorna överensstämmer och anses inkludera tillräcklig många parametrar för att komplettera modellen påbörjades utvecklingsarbetet av kör-rutts-diagrammen. Genom att manuellt öka kurvan efter vilken modellen försöker följa uppstår möjligheten att undersöka hur vidare hastighetsökningar är möjliga med de existerande begränsningarna. Resultat vid simulering med hastighetsökningar påvisar om snabbare varvtider och högre poäng erhålls, enligt Formula Students regelverk. Observera att dessa hastighetsökningar enbart appliceras på banans raksträckor. Utefter detta undersöka de involverade parametrarnas enskilda åverkan och påverkan på slutresultatet.



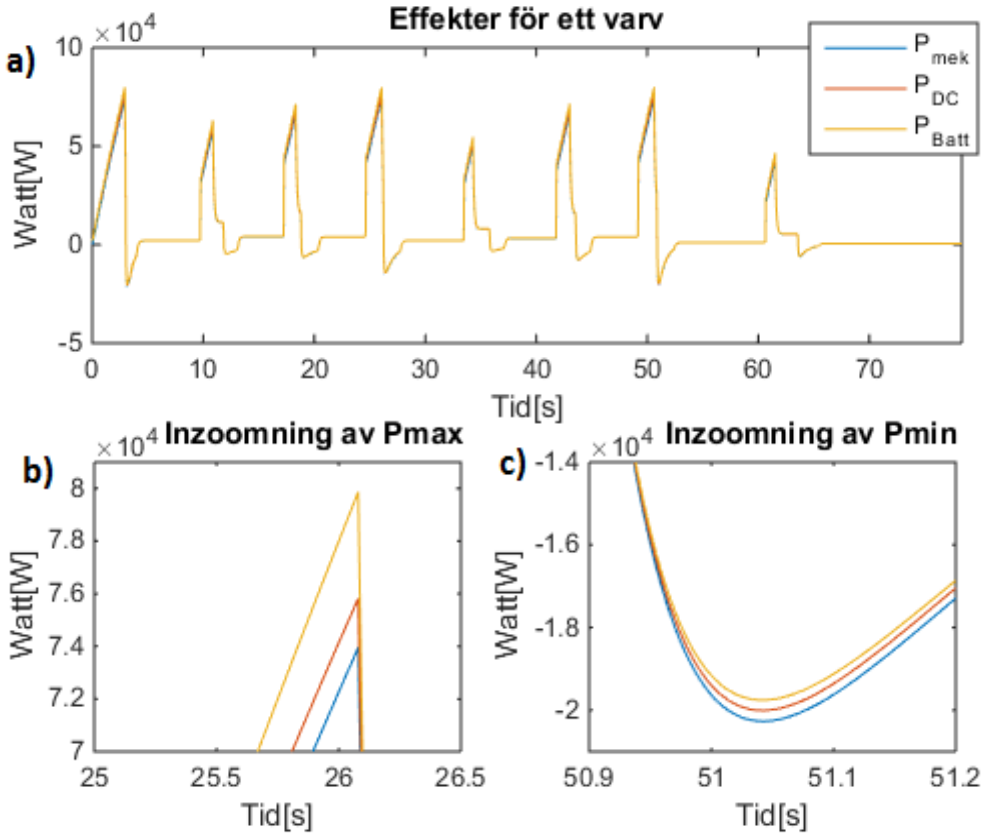
Figur 5.5 – kör-rutts-diagram implementerat i modell för simulering av ett lopp under Autocross

6. Resultat

Nedan presenteras resultaten erhållna ur projektets simuleringsmodell.

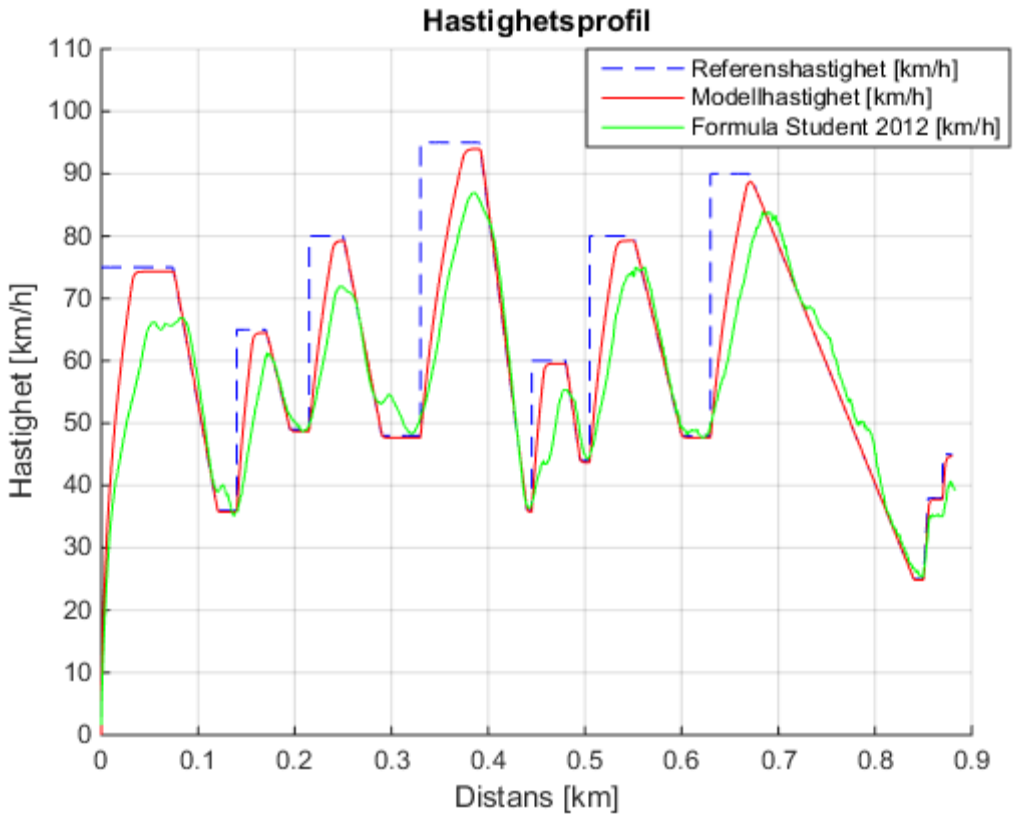
6.1 Simuleringsmodellen

I figur 6.1 visas batterieffekten, batterieffekten med spänningsförlusterna över inre resistansen och den mekaniska effekten. Vid acceleration, samt vid hög hastighet ökar effektbehovet vilket avläses ur figur 6.1a. Batterieffekten är den största effekten, i annat fall existerar inte energi att driva systemet, skulle detta inträffa existerar felaktigheter i modellen. Ytterligare lägre är effekten ur batteriet eftersom energi förloras över batteriets inre resistans. Den lägsta effekten bör vid korrekt simuleringsmodell vara den mekaniska, detta då förluster uppkommer över batteriets inre resistans samt förluster i PMSM vilket visas i 6.1b. Vid retardation bör, den mekaniska effekten vara största negativa följt av de andra effekterna då motorn istället regenererar energi in i systemet, vilket valideras i figur 6.1c.



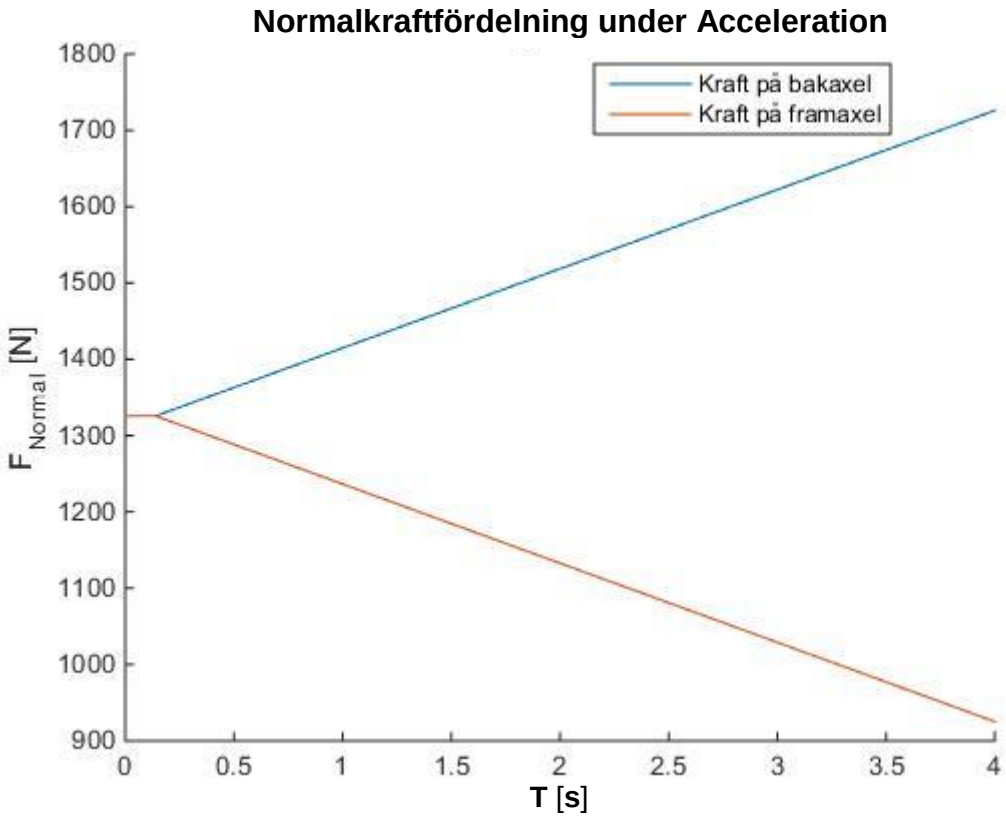
Figur 6.1 - batterieffekt med samt utan förluster och mekanisk effekt för ett varv under Autocross

För att säkerställa modellens validitet utfördes ett flertal simuleringar som jämfördes med verkliga värden erhållna från CFS2012 Silverstone-tävlingen. I figur 6.2 visas ett varv på autocross-loppet där data ifrån 2012 bilen antas vara optimal. Värt att tillägga är att Autocross körs enbart under två varv vilket gör att bilen pressas till det yttersta och kurvhastigheterna blir något högre än Endurance. Föraren som här ersatts med en PI-regulator erhåller en referenshastighet, och försöker likna denna. Referenshastigheten visar hastighetsbegränsningarna vid varje raksträcka samt simulerad kurva och när Formula-bilen behöver påbörja retardation för att inte förlora grepp och köra av banan.



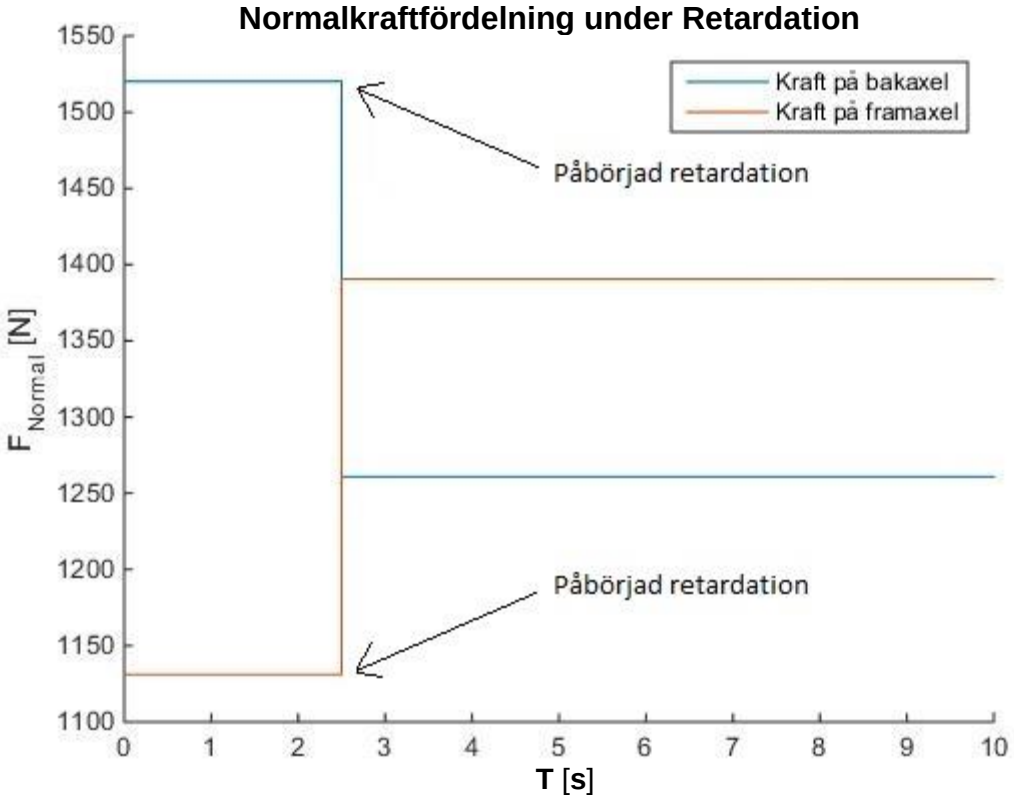
Figur 6.2 - optimerad kör-rutts-diagram som tagits fram genom data från Formula-bilen 2012 i autocross-loppet.

Figur 6.3 och 6.4 visar normalkraftfördelning på fram- och bakaxeln under acceleration respektive retardation. För fallet i figur 6.3 baseras förhållandena då en acceleration från en stillastående start sker. Viktförskjutning sker då som orsakar att normalkraften ökar på bakaxeln och minskar på framaxeln. Notera att normalkrafterna är lika stora mellan intervallet 0-0.2s, detta är en konsekvens av centrerat masscentrum på Formula-bilen vilket är ekvivalent med 50:50 viktfördelning som antas i modellen.



Figur 6.3 - Normalkraftfördelning från en stillastående start

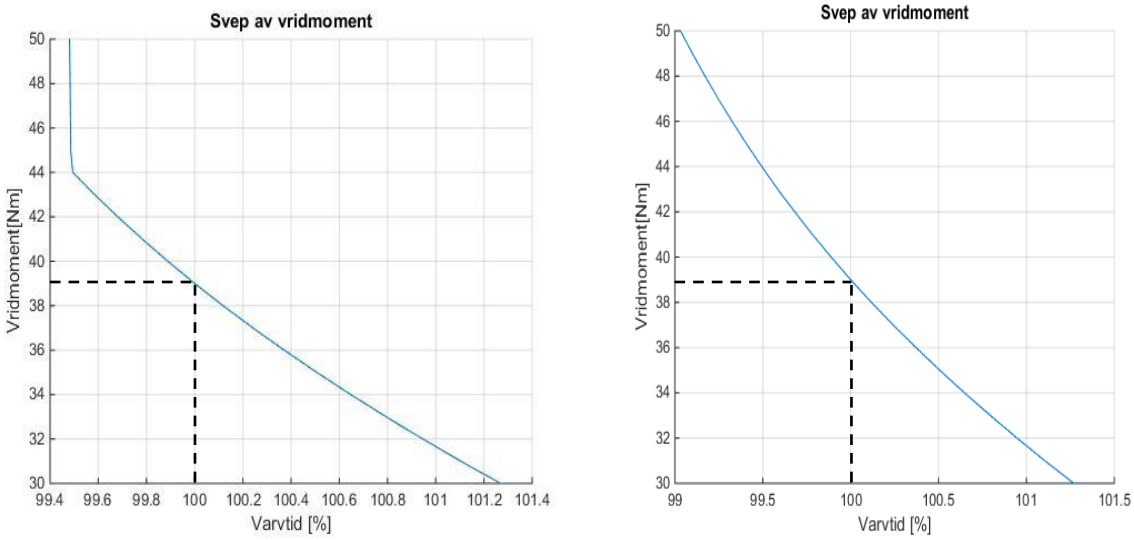
Förhållandena som ligger till grund för figur 6.4 baseras på en hastig retardation från en pågående acceleration. Viktförskjutning sker som orsakar att normalkraften på framaxeln blir större än normalkraften på bakaxeln, detta i enighet med teorin i avsnitt 5.2.



Figur 6.4 - Normalkraftfördelning från pågående acceleration till retardation

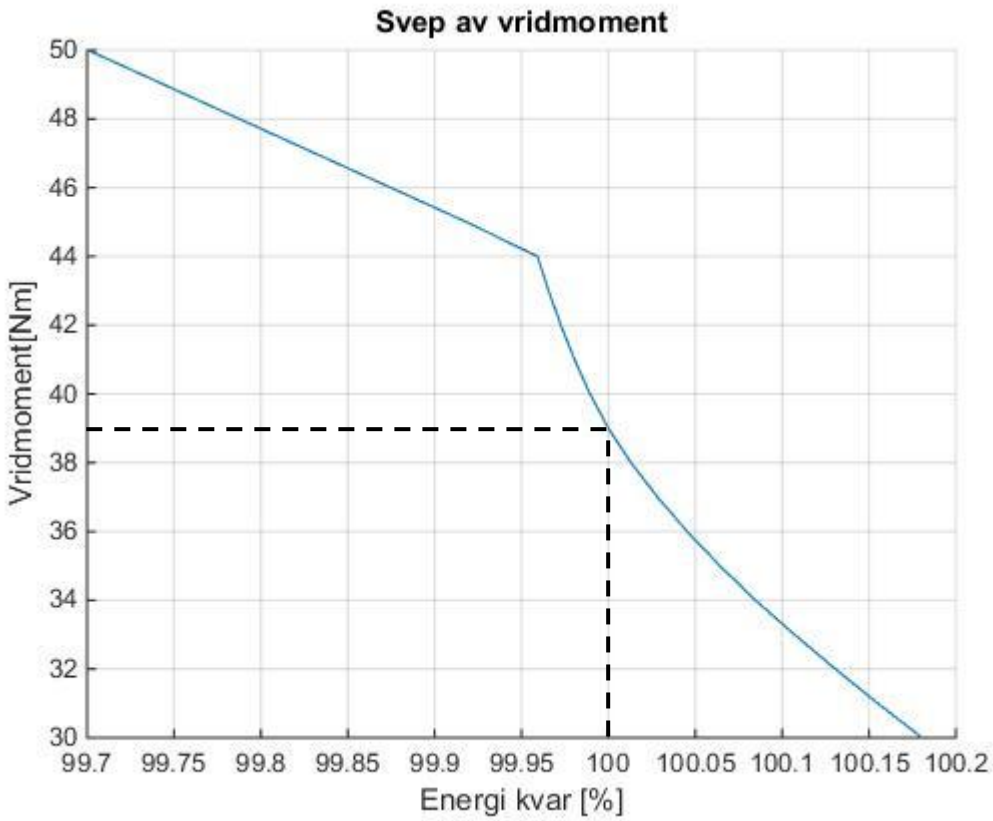
6.2 Motor

När vridmomentet sveps så används 39 [Nm] per motor, bilens totalavikt på 270 kg samt ett $\mu_{Däck}$ som är 70% av $\mu_{Däck,max}$ som ett grundtillstånd, vilket markeras med sträckade linjer i figurerna. Ett intervall på 30 till 50 [Nm] för att få en bra översikt över hur vridmomentet påverkar varvtiden vilket plottas i figur 6.5a. Till en början erhålls ett relativt linjärt resultat fram till 44 [Nm], varvtiden förbättras sedan inte i samma utsträckning som vid lägre vridmoment. Detta beror på att modellens antispinn-system går in och begränsar vridmomentetmomentet då däcken inte längre klarar av att föra ner kraften i marken, vilket i sin tur resulterar i att varvtiden nästan upphör att förbättras. En simulering gjordes med ett $\mu_{Däck,max}$ på 80% istället för tidigare 70% för att bekräfta att så var fallet. Detta visas i figur 6.5b där också varvtiden fortsätter att förbättras efter 44 [Nm].



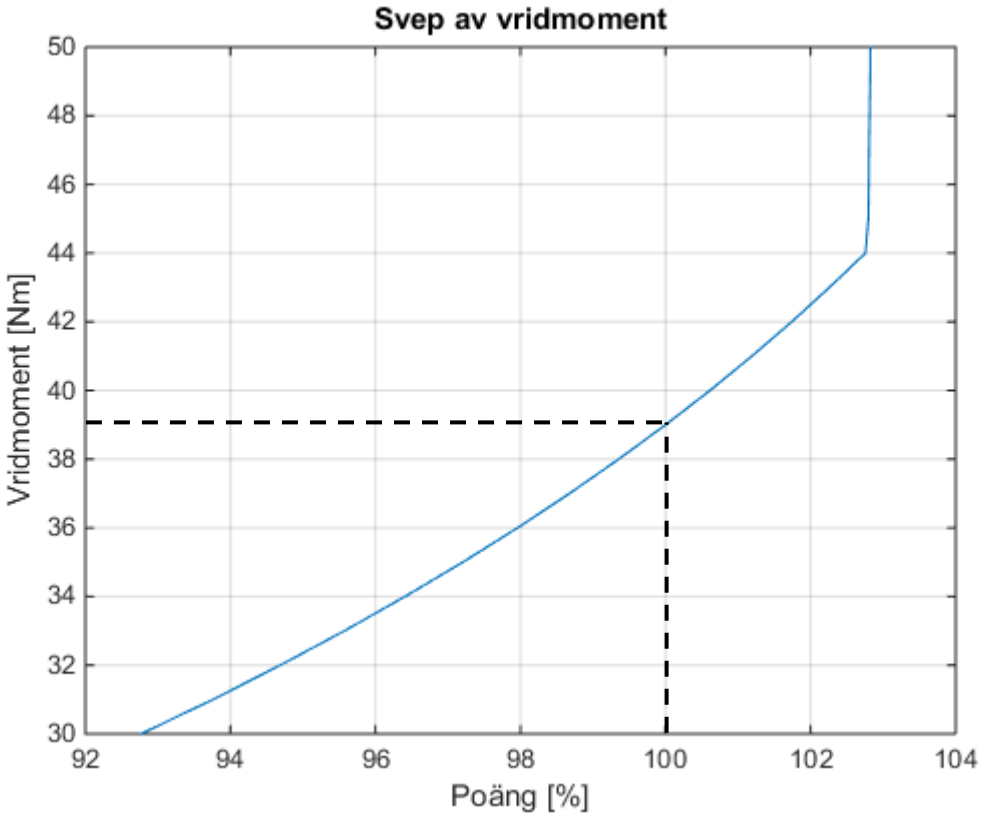
*Figur 6.5.- a) Vridmoment då $\mu_{Däck,}$ är 2.37*70%, b) Vridmoment då $\mu_{Däck}$ är 2.37*80%*

För att visa hur skillnader i maximalt vridmomentet påverkar förbrukningen av energi efter ett varv så illustreras det i figur 6.6. Även i detta fall så uppträder en abnormalitet vid 44 [Nm] vilket uppkommer på grund av att antispinn-systemet begränsar.



Figur 6.6 - Illustration av hur mycket energi som finns kvar efter ett varv svept över olika vridmoment.

Ett annat intressant fall är att se hur vridmomentet påverkar poängskörden i tävlingen. Detta visas i figur 6.7. Åter igen så begränsas ökningen av att mer vridmoment inte kan överföras till däcken.



Figur.6.7 - Illustration av hur mycket poäng som kan tjänas in beroende på vridmomentet.

6.3 Batteri

Batterimaterialet som valdes var litium-kobolt där alla batteriparametrarna kommer ifrån produktbladet, se bilaga B och parametrarna som plockades ut visas i tabell 6.1. Ur Formula Students regelverk anges maximala spänningen och maximala effekten batteriet får leverera även detta visas i tabell 6.1.

Tabell 6.1 – Utnyttjade batteriparametrar

Batteri kapaciteten	10 Ah
I_{max}	200 A
I_{nom}	150 A
P_{max}	80 kWh
V_{max}	600 V

Det beräknas med ett SOC fönster på 20-90% vilket resulterar i att den totala kapaciteten [Ah] multipliceras med 0,7. Maximalt antal celler i serie som kan leverera maximal energi, där x är antal celler i serie:

$$V_{max} = 600\ [v]$$

$$V_{nom} = x \cdot V_c = x \cdot 3{,}7[V]$$

$$P_{nom} = x \cdot V_c \cdot I_{nom} = xP_{nom} = x \cdot 3{,}7 \cdot 155 = 555x\ [W]$$

$$P_{max} = x \cdot V_c \cdot I_{max} = x \cdot 3{,}7 \cdot 200 = 740x\ [W]$$

$$P_{max} = 80\ 000\ W \rightarrow 740x = 80\ 000 \rightarrow x = 108.1\ \approx 108\ st$$

$$E_{Batt} = x \cdot V_c \cdot Ah = 108 \cdot 3{,}7 \cdot 9 = 3596{,}4\ \approx 3{,}596\ kWh$$

Maximalt antal celler i serie, med två eller tre stycken parallellt kopplade som kan leverera maximal energi blir enligt följande beräkningar nedanför, där x är antal celler i serie och y är antal celler som är parallellkopplade. På grund av strömdelning resulterar det i en lägre ström vid parallellkoppling.

Två stycken parallellkopplad:

$$P_{nom} = x \cdot y \cdot V_c \cdot I_{nom} = x \cdot 2 \cdot 3{,}7 \cdot 0{,}5 \cdot 150 = 555x\ W$$

$$P_{max} = x \cdot y \cdot V_c \cdot I_{max} = x \cdot 2 \cdot 3{,}7 \cdot 0{,}5 \cdot 200 = 740x\ W$$

$$p_{max} = 80\ 000 \rightarrow 740x = 80\ 000 \rightarrow x = 108.1 \approx 108\ st$$

$$E_{Batt} = x \cdot y \cdot V_c \cdot Ah = 108 \cdot 2 \cdot 3{,}7 \cdot 9 = 7192{,}8 = 7{,}193\ kWh$$

Tre stycken parallellkopplade:

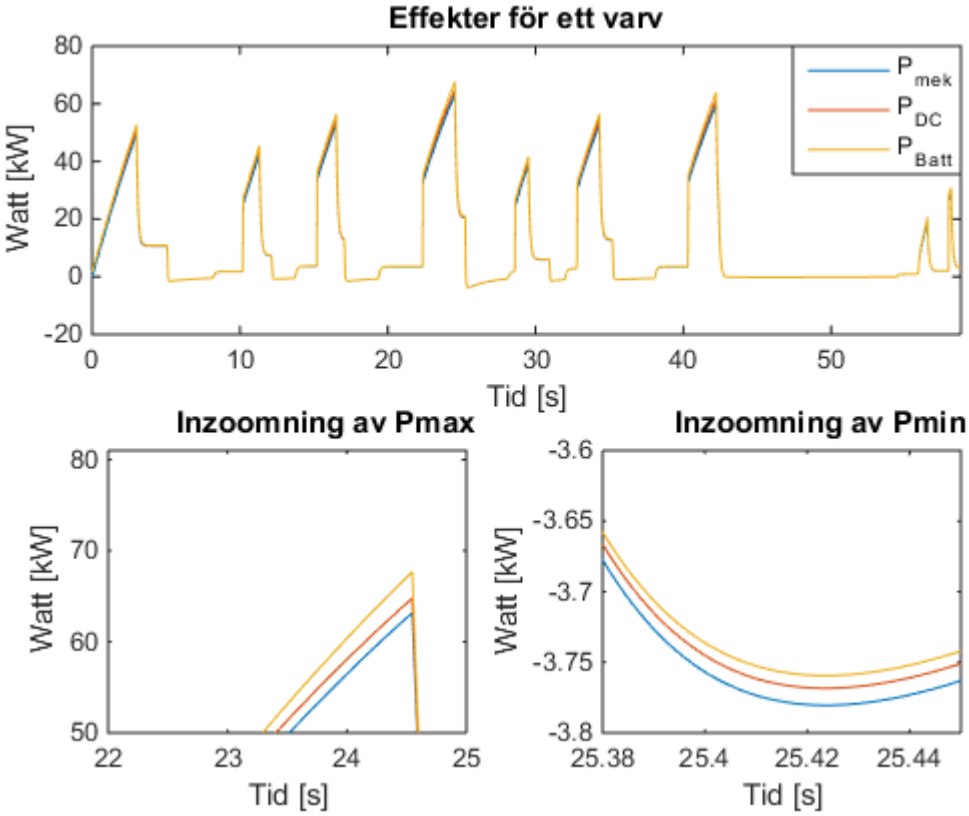
$$P_{nom} = x \cdot y \cdot V_c \cdot I_{nom} = x \cdot 3 \cdot 3{,}7 \cdot 0{,}33 \cdot 150 = 555x\ W$$

$$P_{max} = x \cdot y \cdot V_c \cdot I_{max} = x \cdot 3 \cdot 3{,}7 \cdot 0{,}33 \cdot 200 = 740x\ W$$

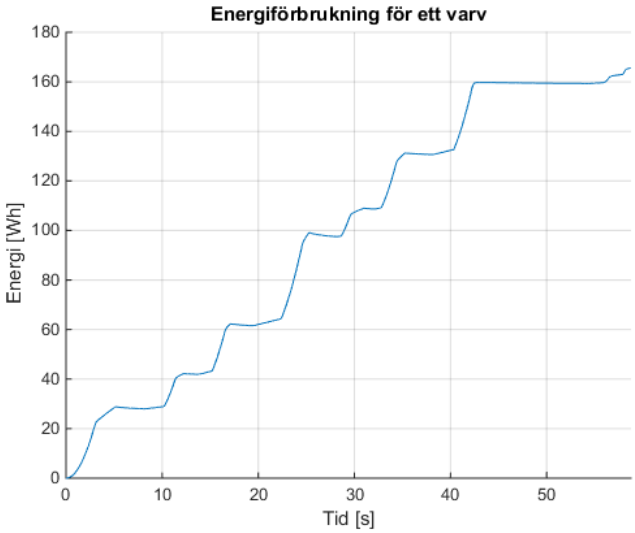
$$p_{max} = 80\ 000 \rightarrow 740x = 80\ 000 \rightarrow x = 108.1 \approx 108\ st$$

$$E_{Batt} = x \cdot y \cdot V_c \cdot Ah = 108 \cdot 3 \cdot 3{,}7 \cdot 9 = 10789{,}2 = 10{,}789\ kWh$$

Ur simuleringsmodellen kan effekten och energin för ett Endurance lopp simuleras detta illustreras i figur 6.8 och figur 6.9. Men hjälp av den simulerande effekten och energin kan batteriets storlek dimensioneras.



Figur 6.8 – Effekten för Endurance under ett varv



Figur 6.9 – Energiåtgången för ett varv under Endurance

Simuleringsmodellen använder optimala förhållanden och därav inga förluster men i en verkligen drivlina finns det förluster för varje komponent. För att kunna dimensionera batteriet måste verkningsgrader beräknas. Förlusterna i komponenterna antas till följande vilket visas i tabell 6.2. Kanske nått mer om ett antagande för att kunna gå vidare

Tabell 6.2 – Antagna verkningsgrader för ingående komponenter

Batteriet	100 %
Efter batteriets inre resistans	99,8%
Kraftelektroniken	98 %
Motorn	90 %
Växellåda	90 %

Detta resulterar i att den totala verkningsgraden i drivlinan blir:

$$1 \cdot 0{,}998 \cdot 0{,}98 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}9 = 0{,}792 = 79{,}2\%$$

Ur figurerna 6.8 och 6.9 erhålls P_{mek} och E_{mek} för Endurance enlig tabell 6.3

Tabell 6.3 – Effekt och Energibehov för Endurance

P_{mek} Endurance	63 kW
E_{mek} 1 varv	170 Wh
E_{mek} Endurance	3910 Wh
P_{mek} verkningsgrad	79,5 kW
E_{mek} Verkningsgrad	4936 Wh

Den maximala effekten P_{Batt} är 80 kW och enligt tabell 6.3 blir P_{mek} 79,5 kW vilket gör att effektkravet $P_{Batt}>P_{mek.}$

För att säkerställa att batteriet inte urladdas för kraftigt samt att det finns tillräckligt med energi för tävla om en bra placering använder projektet en energimarginal på 15%. Detta även för att uppfylla energikravet $E_{Batt}>E_{mek}$

Med en energimarginal på 10 % resulterar detta i önskad energimängd på 5430 Wh detta resulterar i att y=2 då 3,596 < **5,430** < 7,192.

Antal celler i serie med ett SOC fönster på 20-90% blir

$$x = \frac{E_{Batt}}{y \cdot V_c \cdot Ah} = \frac{5430}{2 \cdot 3{,}7 \cdot 7} = 104{,}8 = 105\ st$$

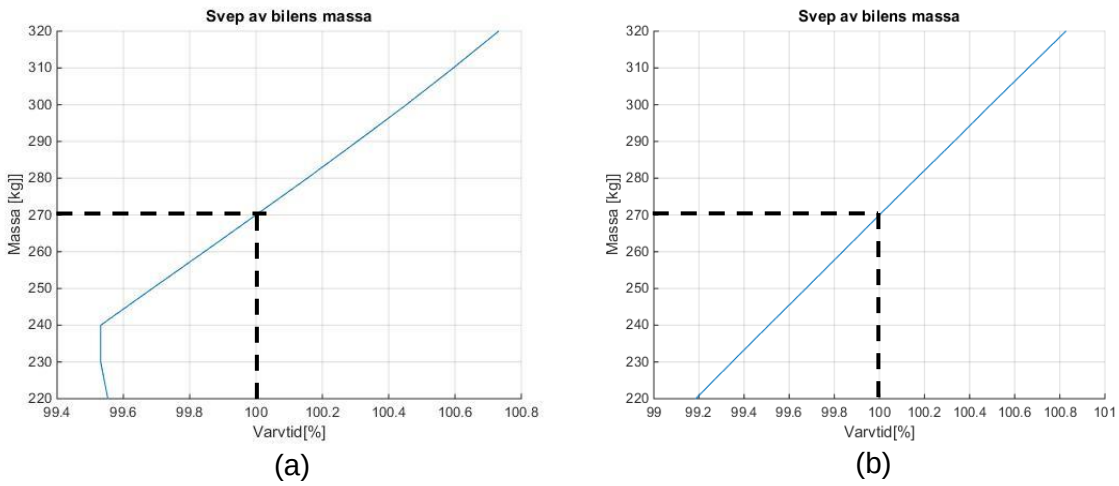
Den totala batteri energin på hela batteripacket innan urladdning blir:

$$E_{Batt} = x \cdot y \cdot V_c \cdot Ah = 105 \cdot 2 \cdot 3{,}7 \cdot 10 = 7770 = 7{,}77\ kWh$$

Enligt bilaga B ges det att cell vikten är 215±3g och då drivlinan behöver ett batteri på 105 st i serie och 2 st parallella ger det totalt 210 celler som resulterar i en total vikt på 45,2 ± 0,6kg. Den inre resistansen per cell är enligt bilagan B 2mΩ vilket resulterar i att batteriets inre resistans blir 0,21Ω

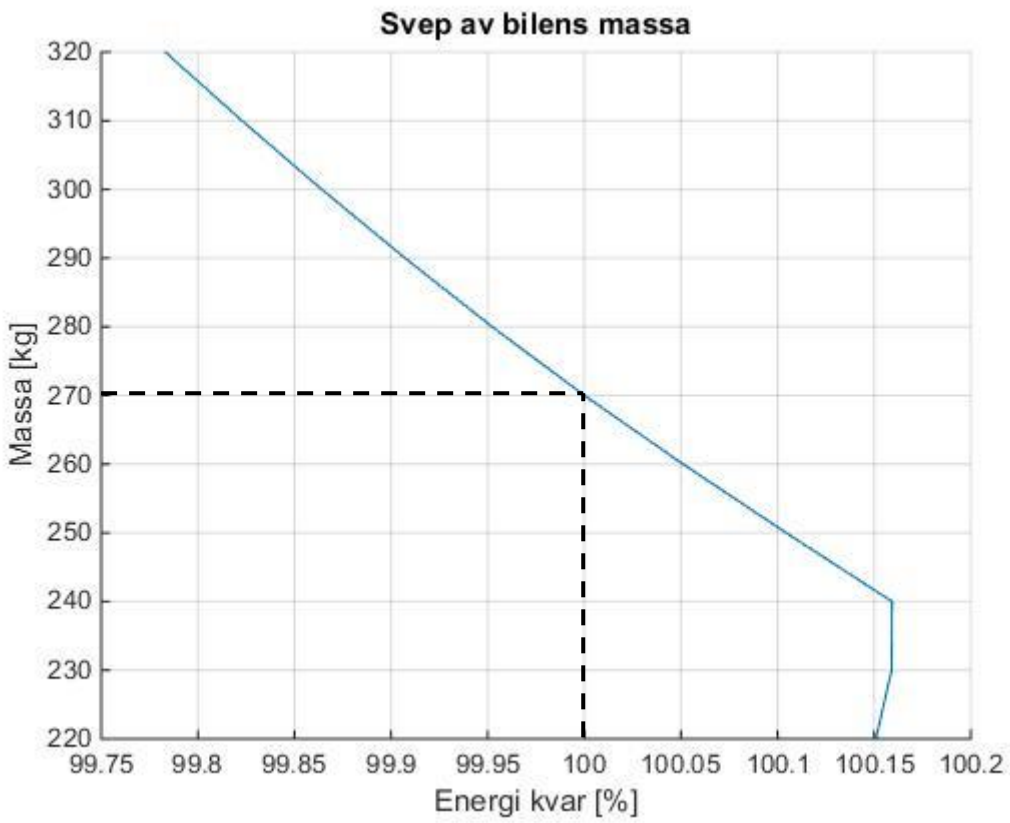
6.4 Parameteroptimering

I simuleringen sattes förhållanden genom iterationer av bilens totala massa och det maximala moment motorn kan leverera. Illustrationer av dessa förhållanden visas i figur 6.10, 6,11. I figur 6.10 och 6.11 innebär 100% på x-axeln de ursprungliga värden på Formula-bilen, på y-axeln visas de förändringar som görs av den specifika parameter som undersöks. 100% på x-axeln har samma innebörd för samtliga figurer 6.10-6.12.



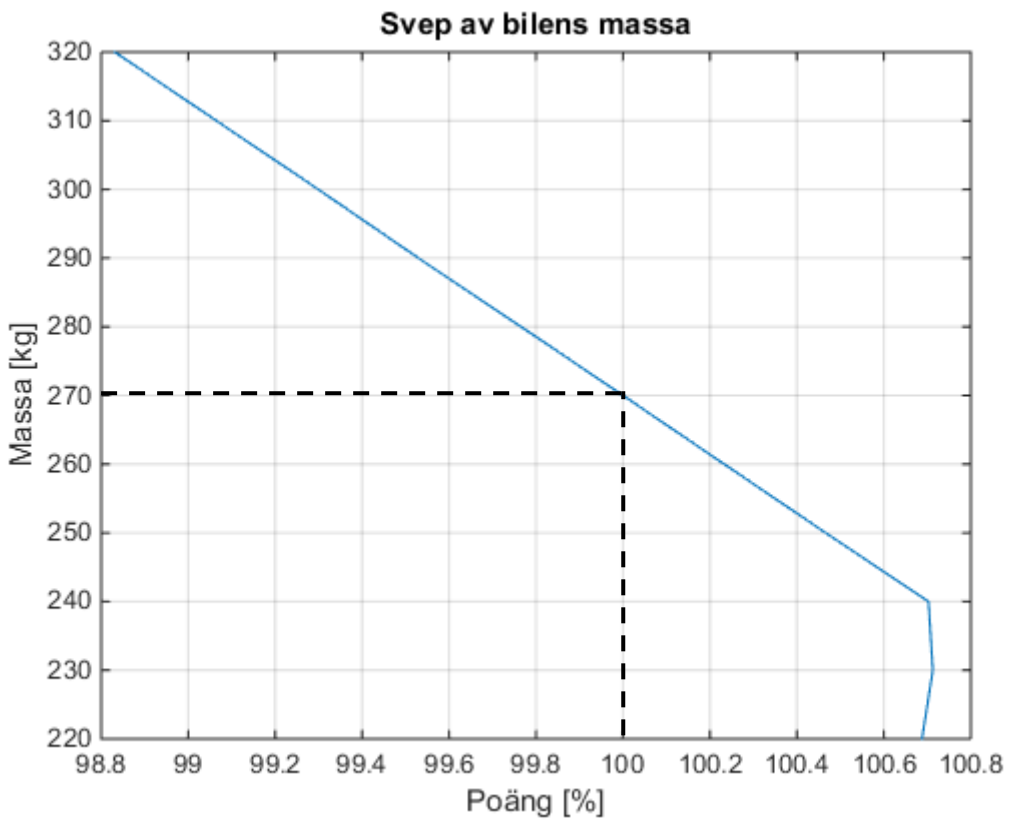
Figur 6.10 - a) Påverkan av massan på varvtid $\mu_{Däck}$=70% av $\mu_{Däckmax}$,
b) samma svep då $\mu_{Däck}$ är 80% av $\mu_{Däck}$

Figur 6.10a beskriver hur varvtiden förändras vid förändringar hos Formula-bilens totala massa, notera att detta gäller för endast ett varv med stillastående start. En tydlig och linjär tendens kan observeras där varvtiden ökar då bilens massa ökar, detta gäller inom intervallet 240-320kg. Inom intervallet 220-240kg sker en icke förväntad företeelse, precis som vid svep av vridmomentet så beror dessa förmodligen på antispinnsystemet. Även här testades att ändra $\boldsymbol{\mu}_{\text{Däck}}$ till ett högre värde för att se hur modellen reagerar vilket ses i figur 6.10b



Figur 6.11 – Kvarstående energiinnehåll relaterat till förändringar i Formula-bilens massa

Figur 6.11 visar kvarstående energiinnehåll i batteriet efter ett varv på x-axeln, detta då massan representeras av y-axeln. Här kan observeras att en linjär företeelse dominerar intervallet 240-320kg där energi innehållet minskar med ökad massa. Däremot observeras även ett avvikande fenomen mellan intervallet 220-240kg. Detta är ett icke förväntad beteende, ytterligare så i intervallet 220-230kg.

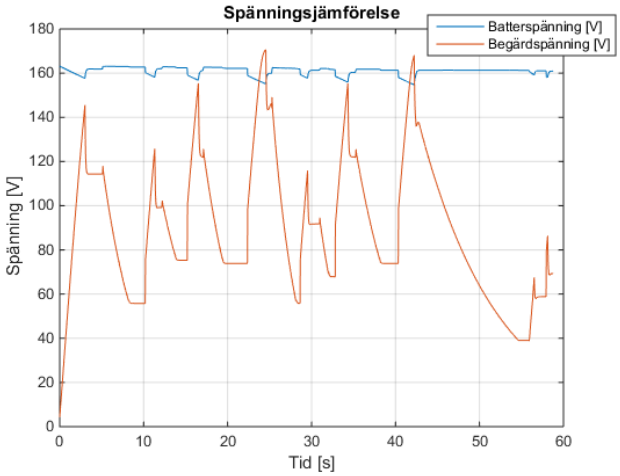


Figur 6.12 – Erhållna poäng relaterat till förändringar i Formula-bilens massa

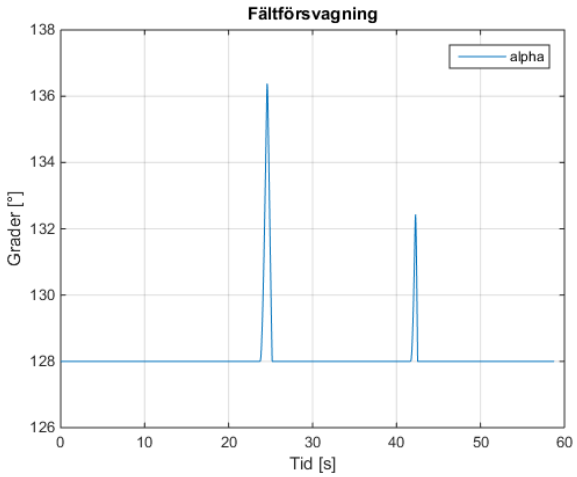
Figur 6.12 visar att vid högre total massa hos Formula-bilen erhålls mindre poäng om samma kör-rutts-diagram implementeras, vilket innebär att föraren följer hastighetsangivelserna från diagrammet exakt. Det kan även observeras att en mindre massa hos Formula-bilen resulterar i högre poäng, ett logiskt resultat i och med att Formula-bilen kan accelerera hastigare då mindre massa krävs förflyttas.

Parametern “begärdspänning” är den spänning systemet begär av batteriet vid en viss tidpunkt, då parametern “batterispänning” är den maximala spänningen som batteriet kan förse systemet med. Denna spänning är samtidigt lika stor som spänningen från växelomriktaren då den antas vara förlustfri.

Fältförsvagningen, som skall ske när batteriets maximalt levererade spänning blir lägre jämfört med den begärda spänningen ifrån motorn, detta illustreras i figur nr.1. I figuren ses även att vid acceleration minskar batteriets maximala spänning samtidigt som den begärda spänningen ökar, vilket är realistiskt då en del förbrukas vid accelerationen. Vid bromsning regenereras en del av batterispänningen då 30% av bromskraften går tillbaka in i systemet och laddar upp batteriet. För att validera att fältförsvagningen fungerar kontrolleras tidpunkterna då begärdspänning överstiger batterispänning och kontrollerar α reaktion. I Figur nr.2 visas hur α höjs då den begärda spänningen överstiger batteriets maximala AC spänning för att fältförsvaga medan den sänks till sitt ursprungliga värde när behovet inte överstiger kapaciteten.



Figur 6.13 a - Jämförelse mellan batteriets maximala AC-spänning och den begärda spänningen



Figur 6.13 b - Graf på hur α höjs för att fältförsvaga vid för hög begärd spänning

7. Diskussion och rekommendation på dimensionering

Under detta kapitel kommer de resultat som erhållits under tidigare kapitel att diskuteras för besvarandet av projektets centrala frågor för varje delmoment, som presenterats i kap 1, kommer att framhävas. Problem, förändringar och spekulationer kring förbättringsmöjligheter kommer här även att belysas.

7.1 Simuleringsmodellen

Efter en färdigställd simuleringsmodell användandes Simulink identifierades ett antal punkter med möjligheter till fortsatt utveckling. Validering utnyttjades för att säkerställa en korrekt fungerande modell. För att underlätta arbete i senare delar av projektet bör detta utföras kontinuerligt då tiden för felsökning ökar i takt med att nya komponenter tillkommer. Om validitet säkerställts innan infogandet av ny komponent dras enkelt slutsatsen att möjliga problem som uppstår efter infogandet av denna härrör modellerandet av den nya komponenten. Enklast utföres validering med hjälp av tidigare erhållna värden och jämförelse av grafer, vilket exemplifieras i figur 6.1.

Projektet har haft sin utgångspunkt i data från CFS2012 på Silverstone, denna utgångspunkt är fördelaktig vid validering, men resulterar även i vissa begränsningar under simulerandet. Exempelvis avgränsas kurvtagning med antagandet att CFS2012 erhöll ett resultat vilket var maximal möjlig kurvtagningshastighet, detta är inte nödvändigtvis fallet. Ett annat exempel kan skådas i figur 6.2 där modellen har en större acceleration än CFS2012. Detta då modellen är i stort sätt förlustfri samt att vi frånser mindre kurvor i banan vilket kan ses om figur 5.4 och 5.5 jämförs där även raksträckorna finns utmärkta. Avgränsningen var dock nödvändig då tillräcklig fordonsdynamisk simulering av lateralrörelser är av sådan komplexitet att de inte var möjliga att utföra med av gruppen tillgänglig information och kunskap under de utsatta tidsbegränsningarna.

För framtida modellering bör en grundligare litteraturstudie relaterat till nödvändig förståelse för modellens komponenter och simulerings-systemets uppbyggnad utföras. En överskådlig blick utav det kompletta systemet bör existera utanför simuleringsprogrammet innan modellerande påbörjas istället för att påbörja modellerande för att sedan upptäcka att tillräcklig kunskap saknas.

Resultaten som erhållits från simuleringsmodellen varierar i de flesta fall inte enligt förväntan. Med de menas att skillnaden för parametersvepningen inte gav utslag på så stora förändringar. Detta beror förmodligen på projektets avgränsningar som gjorts, så som att idealiserade förhållandan har antagits på flera ställen i modellen.

7.2 Motor

Under förutsättningen att drivlinan består av två PMSM motorer visade resultatet att vid vissa högre vridmoment kunde kortare varvtider erhållas enligt figur 6.5a och b. Men vid högre vridmoment ökade också energiförbrukningen som illustreras i figur 6.7. Gemensamt för dessa är att mellan intervallet 44-50 Nm per motor sker ett fenomen som avviker ifrån förändringen mellan 30-44 Nm. Detta beror på att modellens antispinn upptäcker att maximalt möjliga vridmoment är uppnått och begränsar därför vridmomentet som överförs till däcken, detta för att inte spinna okontrollerat. Det blir mer uppenbart att däcken sätter denna begränsningen när $\mu_{Däck}$ ökas till 80 % av maximalt möjliga för Hoosier LC0, då detta tillåter att ett högre vridmoment appliceras innan antispinn-systemet begränsar vridmomentet, detta kan observeras i figur 6.5 b.

Snabbast varvtid erhålls då varje motor presterar 44 Nm maximalt, vilket resulterar i en sänkning av varvtiden på 0.5% jämfört med tiden som erhålls vid grundtillståndet hos Formula-bilen, det vill säga motorerna presterar 10 Nm mer vridmoment, alltså 5 Nm per motor.

En förbättring med 0.5 % motiverar inte nödvändigtvis valet av en kraftfullare motor. Däremot är det motiverbart att se över ingående komponenter i drivlinan, som till exempel kraftelektroniken. Om kraftelektoniken skulle kunna prestera en högre ström så skulle de innebära att motorn skulle kunna prestera högre vridmoment vid samma batterieffekt. En möjlig lösning för att uppnå en förbättning med 0.5 % skulle alltså kunna vara att kraftelektroniken dimensionernas om för en högre ström, som skulle motsvara en ökning på 10 Nm för motorerna. Med denna lösning måste dock motorns lindingar tas till hänsyn för att tåla ökningen av strömmen. Här måste även batteriet tas till hänsyn för att kunna leverera önskad spänning för strömökningen men samtidigt inte överskrida maximal tillåten effekt enligt reglementet. Vad gäller energiförbrukningen så minskas den drygt med 0,04 % jämfört med Formula-bilens grundtillstånd vilket kan anses vara acceptabelt då poängen ökar med närmare 3 % enligt figur 6.7.

7.3 Batteri

Efter en litteraturstudie kring laddningsbara batterier kom det fram att Litium-jon batterier var dem bäst lämpade batterierna på grund av att de har en högre energidensitet än andra batterier, samt att de är mer ekonomiska då de har fler cykler än konkurrerande batterier. Då marknaden för batteri hela tiden utvecklas resulterar detta i nya sammansättningar på batterier och för Litium-jon batterierna i nya katodmaterial. Projektet fördjupade sig i de vanligaste katod-materialen på marknaden som var järn-fosfat och kobolt.

Skillnaden mellan Litium järn-fosfat och Litium kobolt är att energitätheten är något högre för Litium kobolt, Litium järn-fosfat har mindre säkerhetsrisker samt är billigare och är lättare att framställa. En viktig aspekt när drivlinan ska dimensioneras för en Formula-bil är totalt vikten, att ha en lätt och energikraftig Formula-bil kan vara det som avgör resultatet.

Då det är viktigt att hålla nere den totala vikten på Formula-bilen resulterar det i att energidensiteten är viktig att beakta när batteriet dimensionerars. Men då batteriet endast är en av flera komponenter måste inte batteriet med högst energidensitet nödvändigtvis väljas. Formula Students regelverk säger att alla batterier måste ha ett batteriövervakningssytem och en brandvägg för att skydda förare oavsett batterityp. Trotts Litium kobolt har fler säkerhetsrisker ansågs tillräckligt säkert vid implementerandet utav de krävda säkerhetsåtgärderna. Med detta i åtanke så var energidensiteten fortfarande den avgörande faktorn, således valdes ett batteri av typen litium kobolt. Detta trotts ett högre marknadspris, som tidigare nämnts, då projekt inte behövde ta hänsyn till den ekonomiska aspekten då ingen budget fanns.

Genom att använda ett Litium kobolt batteri med 210 antal celler som kan leverera en total energi på 7,77 kWh finns en marginal på 10% jämfört mot vad bilen kommer kräva under Endurance. Anledningen till att batteriet dimensionerades med 10% fler celler än vad Endurance beräknas kräva är i det fall att om något skulle vara felberäknat har laget fortfarande möjlighet att slutföra momenten. Samtidigt som batteriet har en marginal på energimängden gör det att batteriet inte behöver laddas helt ur eller laddas ur för kraftigt vilket även bör minimera risken för att batteriet ska fatta eld.

Saker som skulle kunna vara av intresse för dimensionering för framtida projekt skulle vara att undersöka andra katodmaterial för Litium-jon batterier så som Litium mangandioxid eller Litium mangandioxid-Kobolt. Det skulle även kunna vara av intresse att se om vikten skulle kunna minskas på andra komponenter i Formula-bilen, vilket skulle resultera i möjligheten till ett tyngre batteri. Exempelvis skulle Litium järn-fosfat kunna väljas istället för Litium Kobolt. För trotts att Litium Järn-fosfat har en något lägre energidensitet som då resulterar i en högre batterivikt, så kanske batteriet ändå skulle kunna dimensioneras med färre celler närmare energivärdet för vad Endurance kräver då Litium järn-fosfat inte har samma brandrisker som Litium kobolt.

7.4 Växelomriktaren

Batteriet är det som i slutändan bestämmer hur växelomriktaren behöver dimensioneras. Detta görs genom att kontrollera strömmen som tas från batteriklämmorna och sedan jämföra med specifikationer för olika växelomriktare. Ifall det skulle hända att strömmen från batteriklämmorna överstiger växelomriktarens märkström kommer systemet att haverera. För framtida projekt kan det vara av intresse att studera hur kraftelektronik påverkar systemet då detta projekt har antagit ideella förhållanden.

7.5 Massa

Vid svep av massa visade resultatet att 240 kg ger störst förbättring på varvtid, energiförbrukning samt poäng detta enligt resultatet i figur 6.10a, 6.11 och 6.12. På samtliga figurer observerades en begränsning vid 240 kg, anledningen till detta beror på att antispinn-systemet upptäcker att däcken når sitt $F_{Däck}$ max. Med högre $\mu_{Däck}$ är det möjligt att dra nytta av lägre vikt på bilen, detta bekräftas av figur 6.10 b.

Varvtiden förbättras med nästan 0.5 % som mest, vilket motsvarar en maximal poängökning på 0.7 %. Detta resultat motiverar inte direkt en viktminskning på 30 kg, speciellt när energinförbrukning förbättras endast med ungefär 0.16 % jämfört med grundtillståndet. Det är svårt att minska massan på en redan viktreducerad Formula-bil med en sådan magnitud då varje kilo är noga planerat. Värt att tillägga däremot är att accelerationen kommer förbättras. Om resonemanget istället vänds på så skulle det inte spela en större roll att öka massan utan att varvtiderna skulle påverkas nämnvärt. Dock så räknas varje liten procentuell ökning av varvtiden då det ofta är väldigt jämt mellan bilarna i tävlingarna.

8. Slutsats

I projektet så har en Formula-bil modellerats för att på detta sätt svepa parametrar som har inverkan på sluttiden under en Formula Student-tävling på Silverstone. Med hjälp av data från 2012 års tävling på samma bana har det varit möjligt att kunna avgränsa kurvor på och istället fokuserat enbart på hur modellen beter sig på raksträckorna. Det har också varit möjligt att med hjälp av ovan nämnd data kunna validera att modellen beter sig på samma sätt som dess föregångare gjorde under en verklig tävling vid 2012.

Syftet med detta projektet var att dimensionera en elektrisk drivlina för en Formula Student-bil för projektet Chalmers Formula student. Målet med dimensioneringen var att få en effektiv drivlina där Formula-bilen och laget skulle kunna samla ihop så mycket poäng som möjligt under Formula Student tävlingen. Detta genomfördes genom att bygga en simuleringsmodell i Simulink där parametrar och komponenter optimerades.

Av litteraturstudien och simuleringen framkom det att avgränsningen till att endast analysera den longitudinella fordonsdynamiken var en lämplig avgränsning på grund av komplexitiviten i fordonsdynamiken. Dock hade det varit lämpligare att påbörja litteraturstudien tidigare än att söka fakta allt eftersom problem i simuleringen dök upp. Avgränsningar som projeket haft har resulterat i att drivlinan har modellerats i stort sätt förlustfri. Dessutom har växelomriktaren under detta projekt modellerats som helt förlustfri och där av inte dimensionerats.

Vid analys av motorn har två PMSM motor studerats detta då Chalmers formula 2015 projeket använt sig av dessa samt att PMSM motorn var mest lättillgänglig. Under analysen av motorn framkom det att en ökning av vridmomentet med 5 Nm per motor ger en 3 % ökning i poäng och därför skulle detta vara av betydelse trots att energiåtgången ökar med 0.04%.

Genom en litteraturstudie och simulering anses Litium-Kobolt som ett lämpligt batteri med en hög energidensitet vilket resulterar i en dimensionering på 210 celler, bestående av två stycken parallellkopplade serier om 105 celler. Den totala energimängden i batteriet skulle ligga på 7,77kWh och batteriets vikt på 45,2 kg. Batteriet dimensionerades med en energimarginal på 10% för att batteriet inte skulle laddas ut för kraftigt men även för att kunna ha en energireserv vid Endurance som är den mest energikrävande delmomentet i Formula Student tävlingen. Skulle energiåtgången öka med 0,04% på grund av ett ökat vridmoment skulle detta ändå hamna inom energinmarginalen.

Som en lämplig dimensionering av en drivlina med åtanke på de avgränsingar som gjort under projektets gång och med hjälp av data ifrån Silverstone 2012 som använts resulterar detta i en drivlina bestående av två stycken PMSM motorer på 44 Nm, ett Litium Kobolt batteri på 210 celler med en växelomriktare och en massa på Formula-bilen på cirka 270kg.

Referenslista

[1] Institution of Mechanical Engineers, “The challenge,” *Institution of Mechanical Engineers*, 2013; [Online] Tillgänglig:http://events.imeche.org/formula-student/about-us/thechallenge.
[Hämtad: 2015-02-05]
[2] Chalmers Formula Student, “Formula Student,” *Chalmers Formula Student,* 2015.[Online] Tillgänglig: http://www.chalmersformulastudent.se/formula-student-2/
[Hämtad: 2015-02-05]
[3] Formula SAE, “Rules & important documents,”*Formula SAE,* 2015. [Online] Tillgänglig: http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/. [Hämtad: 2015-02-05]
[4] Institution of Mechanical Engineers, “About us,” *Institution of Mechanical Engineers*, 2013. [Online] Tillgänglig: http://events.imeche.org/formula-student/about-us.
[Hämtad: 2015-02-05]
[5] Chalmers studentportal, “Kandidatarbete,” *Chalmers studentportal,* 2015. [Online] Tillgänlig:https://student.portal.chalmers.se/sv/chalmersstudier/kandidat-och-examensarbete/kandidatarbete/Sidor/Syfte-mal-och-upplagg.aspx?authenticated
[Hämtad: 2015-05-03]
[6] Chalmers Tekniska Högskola AB, “Chalmers Formula Student,” *Chalmers tekniska högskola*, 2013. [Online] Tillgänglig:http://www.chalmers.se/sv/om-chalmers/chalmers-vanner/projekt/Sidor/Chalmers-Formula-Student.aspx. [Hämtad: 2015-02-05]
[7] Institution of Mechanical Engineers, “Rules,” *institution of Mechanical Engineers,* 2013. [Online] Tillgänglig:http://www.fsaeonline.com/content/2015-16%20FSAE%20Rules%20revision%2091714%20kz.pdf [Hämtad: 2015-02-24]
[8] Chalmers Formula Student , "Our Cars," *Chalmers Formula Student,* 2015, [Online]. Tillgänglig: http://www.chalmersformulastudent.se/our-cars/. [Hämtad: 2015-05-06]
[9] F1 technical, “Aerodynamics in racing,” *F1 technical*, 2015, [Online] Tillgänglig:http://www.f1technical.net/articles/10 [Hämtad: 2015-05-07]
[10] Race Technology, “What is Race Technology data analysis software”, *Race Technology*, 2015. [Online] Tillgänglig:http://www.race-technology.com/main_analysis_software_2_37.html [2015-03-18]
[11] G. Genta et al, The Motor Car: Past, Present and Future, Torino: 11-14. Department of Mechanical and Aerospace Engineering,Politecnico di Torino, 2012.[E-bok] Tillgänglig:http://link.springer.com/book/10.1007%2F978-94-007-8552-6
[Hämtad:2015-05-06]
[12] R.Krishnan, Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives, Electrical and Computer Engineering Department Virginia Tech Blacksburg,Virginia, U.S.A, 2010. [E-bok] Tillgänglig:http://www.crcnetbase.com/isbn/9781420014235
[2015-03-10]
[13] Batteriföreningen, Batteriets historia, *Batteriföreningen*, 2011. [Online] Tillgänglig:
http://batteriforeningen.se/om-batterier/batteriets-historia/ [2015-05-14]
[14] Z.Wang och W.Zhang, “Battery system matching and design for a formula student electric racecar” IEEE Xplore Digital Libary. [online] Tillgänglig:http://ieeexplore.ieee.org.proxy.lib.chalmers.se/xpls/icp.jsp?arnumber=69407

[2015-02-14]
[15] Batteriföreningen, Allmänt om batterier, *Batteriföreningen*, 2011. [online] Tillgänglig: http://batteriforeningen.se/om-batterier/allmant-om-batterier/ [2015-02-28]
[16] J.Amirault et al, "The electric vehicle battery landscape: Opportunities and challenges" Center for entrepreneurship and technology/University of Californa, Berkly, Californa, USA, 2009.9.v.1.1, 2009. Tillgänglig: https://ikhlaqsidhu.files.wordpress.com/2010/03/nr-electricvehiclebatterylandscape_1221-1.pdf [Hämtad: 2015-02-26]
[17] Celltech, Batterisystem- egenskaper, mm, *Celltech*, 2015. [online] Tillgänglig: http://www.celltech.se/foretaget/batteriskolan/Batterisystem.-egenskaper-m.m./ [2015-02-28]
[18] S.andåker et al, "Batterier i Elbilar- en miljöanalys," Lunds tekniska högskola, Lund, Svergie, 2012
Tillgäglig:http://www.elmat.lth.se/fileadmin/user_upload/Foretagande_entreprenorskap/19_Batterier_i_elbilar_-_Grupp_19.pdf [Hämtad: 2015-02-27]
[19] Batteriföreningen, Litiumjoncellens egenskaper, *Batteriföreningen*, 2011.[Online] Tillgänglig:http://batteriforeningen.se/laddningsbara/litium-jon/egenskaper-hos-olika-litiumjonceller-och-batterier/ [2015-05-14]
[20] Elteknik, kompendie, Instutitionen för Energi och miljö, Chalmers Tekniska Högskola AB
[21] N.Mohan et al, *Power Electronics: Converters, Applications and Design,* 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc, 2003.
[22] J.G.Fernández, "A vehicle dynamics model for drivning simulators," Master's Theisis , Chalmers Tekniska Högskola AB, Division of vehicle Engineering and autonomous systems, 2012; Tillgänglig: http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/160346.pdf [Hämtad: 2015-03-18]
[23] B.Jacobsson et a, "Vehicle Dynamics: Compendium for course MMF062," Chalmers Tekniska Högskola AB, Vehical dynamics group division of Vehicle and autonomous system, Göteborg, 2014. [online] Tillgänglig:http://pingpong.chalmers.se/public/courseId/4042/lang-en/publicPage.do. [2015-02-10]
[24] M.Short et al, "Safety and reliability of distributed embedded systems : Simulations of vechicle longitudinal dynamics," University of Leicester, Leicester, England, 2014. [online] Tillgänglig:http://www.le.ac.uk/eg/embedded/pdf/ESL04-01.pdf
[Hämtad: 2015-02-28]
[25] R.Rajamani, Vehicle dynamics and controll, Minneapolis: ID1. Dept. Mechanical Engineering, University of Minnesota, 2012. [E-bok] Tillgänglig: http://link.springer.com/book/10.1007%2F978-1-4614-1433-9 [Hämtad: 2015-02-18]
[26] S.L.Miller et al, Calculating longitudinal Wheel slip and tire parameters using GPS Velocity, Proceedings of American control conference, Arlington, VA juni 25-27 2001. [online]

Bilagor

Bilaga A

Härledning av MTPA

$$T_e = \frac{3np}{2k^2}\left(\psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q\right)$$

$$i_q = I sin(\beta)$$

$$i_d = I cos(\beta)$$

$$T_e = \frac{3np}{2k^2}\left(\psi_m I sin(\beta) + (L_d - L_q) I^2 \sin(\beta)\cos(\beta)\right)$$

$$\frac{dT_e}{d\beta} = \frac{3np}{2k^2}\left(\psi_m I cos(\beta) + (L_d - L_q) I^2 \cos(2\beta)\right) = 0$$

$$\psi_m I cos(\beta) = -(L_d - L_q) I^2 \cos(2\beta)$$

$$\frac{\cos(2\beta)}{\cos(\beta)} = \frac{\psi_m}{-(L_d - L_q) I}$$

$$\cos(\beta + \beta) = cos\beta cos\beta - sin\beta sin\beta = cos\beta cos\beta - 1 + cos\beta cos\beta \rightarrow 2cos^2\beta - 1$$

$$\rightarrow 2cos^2\beta - 1 = -\frac{\psi_m}{(L_d - L_q) I} cos\beta$$

$$\rightarrow cos^2\beta + \frac{\psi_m cos\beta}{2(L_d - L_q) I} = \frac{1}{2}$$

$$\left(cos\beta + \frac{\psi_m}{4(L_d - L_q) I}\right)^2 = \frac{1}{2} + \left(\frac{\psi_m}{4(L_d - L_q) I}\right)^2$$

$$cos\beta = -\frac{\psi_m}{4(L_d - L_q) I} \pm \sqrt{\frac{1}{2} + \left(\frac{\psi_m}{4(L_d - L_q) I}\right)^2}$$

Bilaga B

Produktblad från Melasta

深圳鸿星电池技术有限公司 SHENZHEN MELASTA BATTERY CO., LTD

产品规格书（*Product Specification*） 型号（*Model No.*）*LP9864155 10000mAh 15C 3.7V*

1. 序言 PREFACE

此规格书适用于深圳鸿星电池有限公司的锂聚合物可充电电池产品

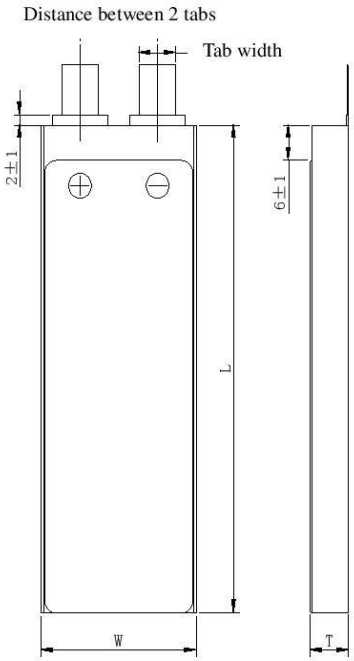
The specification is suitable for the performance of Lithium-Polymer (LIP) rechargeable battery produced by the SHENZHEN MELASTA BATTERY CO., LTD.

2. 型号 MODEL

LP9864155 10000mAh 15C 3.7V

3. 产品规格 SPECIFICATION

单颗电池规格 Specifications of single cell



◆标称容量 Typical Capacity①		10.0Ah
◆标称电压 Nominal Voltage		3.7V
◆ 充电条件 Charge Condition	最大持续电流充电 Max. Continuous charge Current	20A
	峰值充电 Peak Charge current	40A(≤1sec)
	电压 Voltage	4.2V±0.03V
◆ 放电条件 Discharge Condition	Max Continuous Discharge Current	150A
	Peak Discharge Current	200A
	Cut-off Voltage	3.0V
◆交流内阻 AC Impedance(mOHM)		<2.0
◆循环寿命【充电:1.0C,放电:15C】 Cycle Life【CHA:1.0C,DCH:15C】		>100cycles
◆使用温度 Operating Temp.	充电 Charge	0℃~45℃
	放电 Discharge	-20℃~60℃
◆ 电芯尺寸 Cell Dimensions	厚度 Thickness(T)	Max 9.8mm
	宽度 Width(W)	64±0.5mm
	长度 Length(L)	157±0.5mm
	极耳间距 Distance between 2 tabs	29±1mm
◆ 极耳尺寸 Dimensions of Cell tabs	极耳宽度 Tab Width	20mm
	极耳厚度 Tab Thickness	0.2mm
	极耳长度 Tab Length	30mm
◆重量 Weight(g)		215±3
①标称容量：0.5CmA,4.2V~3.0V@23℃±2℃ Typical Capacity:0.5CmA,4.2V~3.0V@23℃±2℃		

3

制造商保留在没有预先通知的情况下改变和修正设计及规格说明书的权力

Melasta reserves the right to alter or amend the design, model and specification without prior notice