

UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

Ricerca e analisi delle soluzioni per il powertrain di una vettura elettrica di formula SAE

Research and analysis of the solutions for the powertrain of an electric formula SAE car

Relatore:

Prof. Sasso Marco

Tesi di Laurea di:

Fattorini Nicola

A.A. **2022** / **2023**

Sommario

Introduzione 1

Background 3

1.1 Veicoli elettrici 3

Motore 3

Inverter 4

Batterie 6

1.2 Regolamento FSAE electric 10

Powertrain elettrico 14

2.1 Il motore 14

2.2 Tipologie motori elettrici 14

2.3 Confronto RWD con 4WD 21

Dinamica verticale 24

Dinamica longitudinale 25

Dinamica laterale 27

Torque Vectoring 28

Conclusioni e raccomandazioni 30

AMK Racing Kit 31

3.1 Scelta del Kit 31

3.2 motore 32

3.3 inverter 37

Conclusioni 40

Appendice 41

Bibliografia 46

Introduzione

La formula SAE (FSAE) è una competizione per studenti universitari a livello mondiale organizzata dalla Society of Automotive Engineers, fu inaugurata nel 1981 all'università del Texas, Stati Uniti, da allora è diventata sempre più popolare ed apprezzata sia tra le università che tra le aziende del settore e non solo. Oggigiorno si organizzano decine di competizioni in tutto il mondo a cui prendono parte più di 500 squadre. È una competizione nella quale gli studenti devono progettare e costruire una macchina stile formula con ruote scoperte con la quale si compete in una serie di eventi statici e dinamici e viene valutata sia in base alle qualità progettuali sia in base ai costi e alle performance in pista. Inizialmente nasce per veicoli con motori a combustione interna, attualmente le categorie per ogni competizione sono 3: classe 1C (veicoli a benzina), classe 1E (veicoli elettrici), classe 1D (veicoli driverless).

L'Università Politecnica delle Marche prende parte a questa competizione ogni anno dal 2013, grazie al polimarche racing team, una squadra di studenti provenienti da tutte le varie facoltà dell'ateneo.



Figura 1: Polimarche Racing Team, Formula SAE Italy, Varano de Melegari

Nelle competizioni Formula SAE le vetture elettriche sono presenti dal 2010. Tutte le più Prestigiose università europee partecipano con le loro vetture e cercano di innovare guardando al futuro. Tutte le competizioni stanno dando sempre più spazio alle vetture elettriche riservando un numero maggiore di posti per le auto elettriche a discapito di quelle con motore a combustione. Cominciare a costruire un background di competenze per una vettura elettrica è fondamentale per il polimarche racing team per continuare ad essere competitivi negli anni a venire.

Questa tesi ha lo scopo di descrivere lo studio preliminare fatto dal gruppo di ricerca e sviluppo del Polimarche Racing Team riguardante la progettazione di un veicolo elettrico FSAE focalizzandosi su i componenti più importanti che compongono un veicolo elettrico a batteria. Si descrive inoltre i principali passaggi che hanno portato all'acquisto del kit composto da motori ed inverter per la prima vettura elettrica del team.

Nel capitolo 1 si fa un introduzione dello stato dell'arte dei veicoli elettrici al giorno d'oggi per poi analizzare il regolamento Formula SAE e le restrizione costruttive imposte per i veicoli elettrici.

Nel capitolo 2 si analizza nel dettaglio il powertrain per una vettura SAE analizzando i motori elettrici e le disposizione che possono assumere nella vettura.

Infine nel capitolo 3 è mostrata la tipologia di powertrain scelto per la prima vettura elettrica dell'università, analizzando caratteristiche e confrontandolo con altre soluzioni possibili.

Capitolo 1

Background

1.1 Veicoli elettrici

Esistono 3 principali gruppi di veicoli elettrici in commercio: i veicoli elettrici a batteria (BEV) che utilizzano una propulsione totalmente elettrica, è questa categoria di veicoli che verrà trattata in seguito. Esistono però anche veicoli ibridi (HEV), veicoli che sfruttano sia motori elettrici che termici, questi posso essere utilizzati solamente per ricaricare le batterie oppure possono funzionare parallelamente al motore elettrico. Infine vanno menzionati anche i veicoli fuel cell (FCV); ancora in fase di sperimentazione questi veicoli utilizzano l'idrogeno come combustibile per produrre energia elettrica.

I componenti che contraddistinguono un BEV da un veicolo a combustione sono: motore elettrico, unità di controllo del motore elettrico (inverter) e pacco batteria con relativo BMS (Battery Menegment System), cioè un componente elettrico che ha lo scopo di coordinare e gestire le celle del pacco batteria.

Motore

Fornisce la trazione alla vettura ed è responsabile della gran parte dell' efficienza dei consumi e del comfort di guida, nonché delle prestazioni dell'auto. Nel campo dei BEV, i motori elettrici possono essere di diversi tipi. Il vantaggio principale di un motore elettrico è la sua capacità di fornire la coppia massima su qualsiasi intervallo di velocità di rotazione, anche da fermo cioè zero giri/motore. Il tempo di risposta tra la richiesta e la generazione della coppia è quindi dalle 10 alle 100 volte più veloce per un motore elettrico confrontato con un motore a combustione interna.

La curva del motore a combustione interna *[figura.2]* mostra che la coppia massima viene prodotta in un piccolo intervallo di velocità, quindi avrò la necessità di un numero idealmente elevato di marce con diversi rapporti per spostare il punto di massimo

all'aumentare della velocità del veicolo. In confronto, un motore elettrico può richiedere un solo rapporto di trasmissione che consente al motore elettrico di produrre istantaneamente la coppia di picco e sostenere la potenza richiesta senza interruzione.

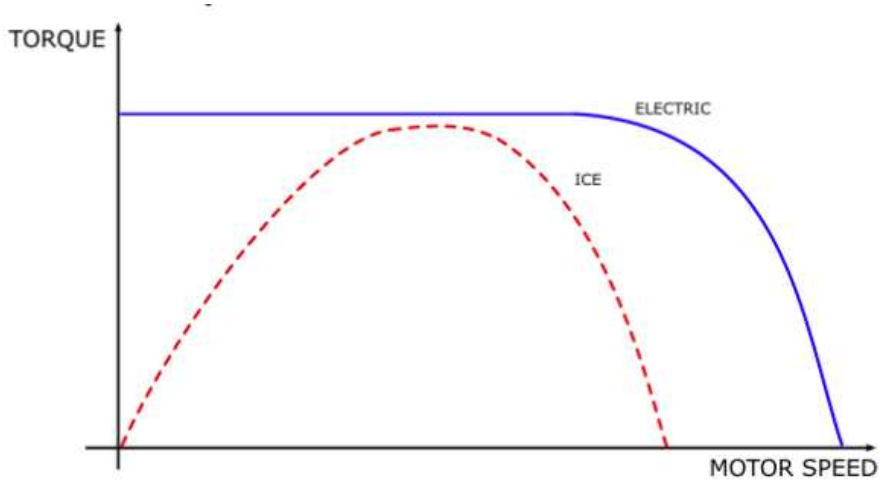


Figura 2: confronto curva coppia-velocità di un motore elettrico e un motore a combustione interna

I motori elettrici inoltre sono significativamente più efficienti dei motori IC, i motori IC convenzionali hanno un range di efficienza nella regione dal 15 al 25% mentre i motori elettrici hanno un efficienza anche superiore all' 80% e questo comporta che i motori elettrici solitamente hanno un rapporto peso-potenza maggiore e dimensioni ridotte. Questo in alcuni ambiti come ad esempio la formula SAE consente il montaggio dei motori elettrici all'interno del mozzo ruota producendo così una trazione integrale. (questa applicazione verrà approfondita nel capitolo 2 quando si fara un confronto dettagliato tra 4WD e RWD).

Inverter

L'inverter è un componente converte la corrente continua DC in corrente alternata AC, nei veicoli elettrici l'inverter ha la funzione di collegare il pacco batterie (DC) al motore che lavora in AC. Ha inoltre la funzione di controllare il motore elettrico attraverso la modulazione della frequenza della corrente in entrata, perché a seconda della tensione in entrata ai motori elettrici trifase varia il loro numero di giri. Mentre la coppia varia in base

all’ampiezza dell’onda. Per fare un parallelismo si può dire che un motore elettrico riceve inputs dall’inverter come un motore a benzina riceve inputs dalla valvola a farfalla.

Esistono varie tipologie di inverter, il più comune è formato da sei mosfet disposti come lo schema in *[figura 3]* questa tipologia di inverter è in grado di controllare sia motori a induzione che motori a magneti permanenti.

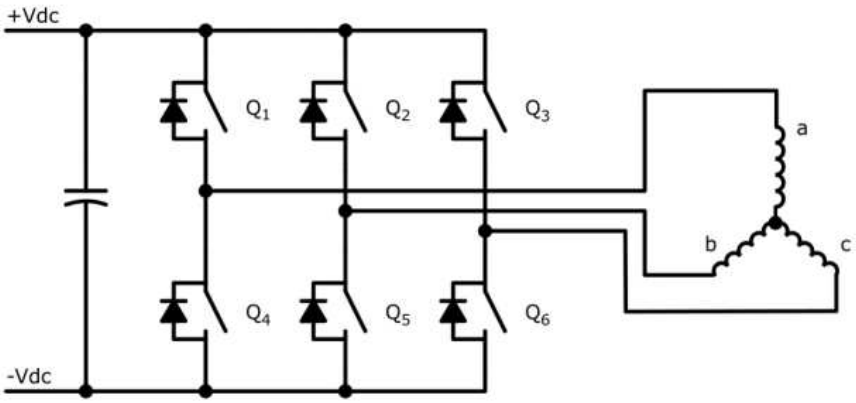


Figura 3: schema elettrico di un inverter a tre fasi

Lo stato dei mosfet in *figura [3]* determina la direzione attraverso la quale la corrente arriva al motore, per esempio se gli interruttori Q1 e Q6 sono chiusi arriverà corrente alla fase *a* e alla fase *c* del motore e la direzione sarà da *a* a *c* . Questo ne determinerà una specifica onda con ampiezza e frequenza prestabilite.

Questo strumento deve pilotare una grande quantità di potenza, pur necessitando di avere un’uscita sinusoidale che sia più precisa possibile, questo lo rende un oggetto ingegneristicamente molto complesso, che va a fondere l’elettronica di potenza, con le complicate leggi di controllo di un motore. Deve essere affidabile, robusto, potente e allo stesso tempo efficiente. L’inverter ha un grande impatto sull’efficienza del veicolo, prima di tutto deve pilotare gli interruttori che commutano le correnti in modo più efficiente possibile, oltre a questo ha anche la funzione di gestire la rigenerazione della corrente in frenata, quindi di ricaricarne le batterie.

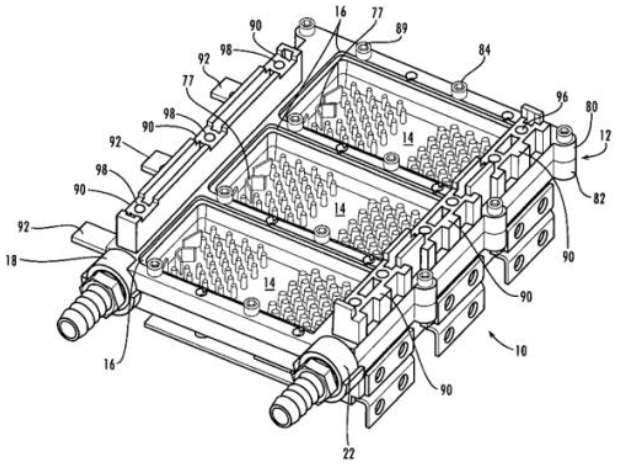


Figura 4: PM100DX fornisce 100 kW di potenza di picco, è raffreddato ad acqua e con un rendimento del 97%.

Batterie

Il pacco batterie è l'ultimo elemento dei veicoli elettrici che analizzeremo. Verrà fornita una veloce panoramica sulle diverse tipologie di batterie, non si entrerà nel dettaglio sullo stato dei lavori del nostro pacco batterie perché è un argomento trattato da un altro gruppo di lavoro.

Una batteria è uno strumento composto da due elettrodi (anodo e catodo) isolati elettricamente l'uno dall'altro da un separatore ionico conduttivo. L'energia elettrica viene prodotta quando avviene una reazione chimica dell'elettrolita con il catodo (potenziale più alto) e l'anodo (potenziale più basso); avviene quindi un trasferimento di ioni caricati positivamente attraverso l'elettrolita e di elettroni attraverso un circuito elettrico *[figura 5]*. Variando il materiale utilizzato per creare l'anodo, il catodo e l'elettrolita si modificano le prestazioni e le qualità della cella della batteria.

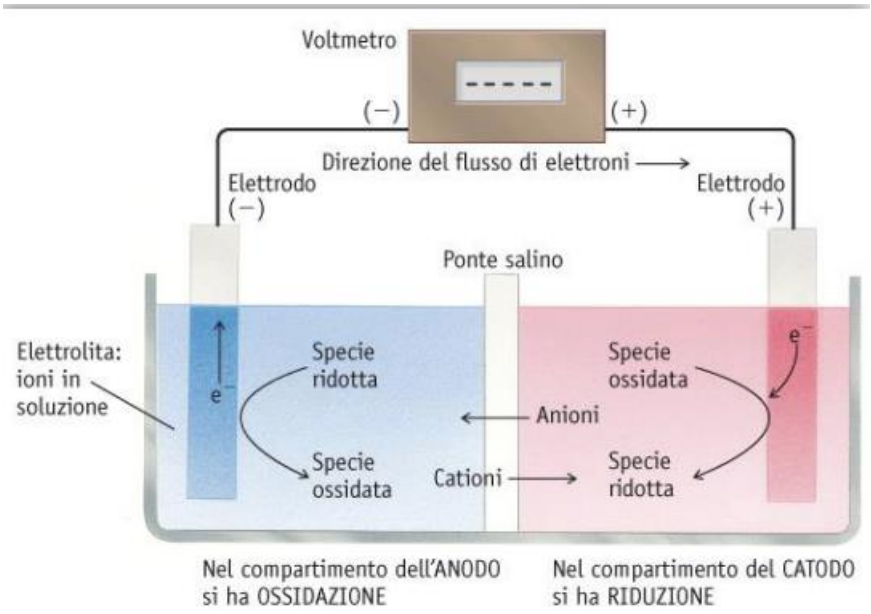


Figura 5: esempio schematico pila Daniel

Confronto tra diverse chimiche:

-lead acid: Sono le più vecchie batterie ricaricabili, molto robuste, resistenti agli stress ed ormai molto poco costose. Hanno una bassa energia specifica, un ciclo di vita ridotto, e la ricarica è molto lenta, questo le rende non ottimali per un'applicazione BEV, ma vengono comunque molto usate in altri ambiti meno pretenziosi per via del loro basso costo ed il loro smaltimento più semplice.

-Nickel-cadmium NiCd: Anche esse abbastanza mature, sono usate quando c''e bisogno di molti cicli di vita, correnti di scarica alte, e temperature estreme. Grazie alla loro particolare robustezza sono le migliori nelle applicazioni più delicate come quelle aereospaziali o mediche, ma non vengono utilizzate negli altri ambiti meno specifici: sia per la loro bassa energia specifica, che per la tossicità del cadmio (Cd).

-Nickel-metal-hydride NiMH: Create per sostituire le NiCd, integrano solo metalli leggermente tossici, e possiedono una migliore energia specifica (30-40%). Rispetto alle NiCd hanno un ciclo vitale minore, un alto tasso di auto-scarica , ed hanno bisogno di un circuito di protezione per la carica essendo molto sensibili alle sovra cariche. Sono disponibili anche per l'uso domestico ed in qualche applicazione automobilistica.

-Lithium-ion Li-ion: le batterie Li-Ion sono attualmente predominanti per i veicoli elettrici. La ragione di questo fatto è la loro energia specifica elevata (Wh/kg), ciclo vitale ed alta efficienza. Le Li-Ion non hanno effetto memoria e hanno una maggiore durata. In più, se facciamo una comparazione con la batteria NiCd, questa si scarica molto più velocemente. Il maggiore difetto è che sono molto delicate e hanno bisogno di una protezione nel circuito per avere un impiego sicuro.

Tabella 1: pro e contro batterie Li-ion

Vantaggi	• Alta energia specifica e alta capacità di carica • Lunghi cicli, lunga vita e poca manutenzione • Alta capacià, bassa resistenza interna e buona efficienza di corrente • Carica semplice e tempistiche ragionevoli di carica • Bassa capacità di auto scarica
Limitazioni	• Ha bisogno di un circuito di prevenzione per evitare che la batteria si surriscaldi • Le prestazioni della batteria diminuiscono ad alte temperature e quando il voltaggio è elevato • Caria veloce non è possibile a temperature sotto lo zero • Il loro trasporto richiede degli accorgimenti di sicurezza

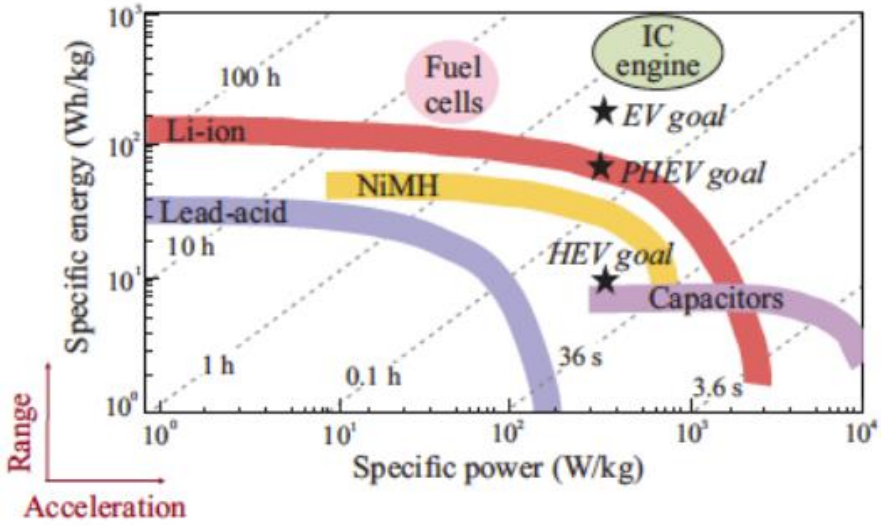


Figura 6:contronto tra le diverse chimiche delle batterie

Le batterie per i veicoli elettrici sono molto diverse dalle classiche batterie automobilistiche, queste ultime sono batterie lead acid perché particolarmente robuste ed economiche, mentre nei veicoli elettrici si utilizzano batterie con migliori caratteristiche chimico-fisiche ed una più alta densità elettrica, cioè la capacità per unità di volume.

Tipologie batterie in commercio:

Le celle cilindriche *[figura 7b]* sono in assoluto le più utilizzate. Gli elettrodi e il separatore sono disposti a spirale per massimizzare la superficie disponibile per la reazione chimica, e sono contenuti in un rivestimento d'acciaio. Questo le rende più pesanti delle altre tipologie di celle ma più resistenti e affidabili e mantengono una densità energetica comparabile. La dimensione più comune è la 18650 (diametro 18 mm, lunghezza 65 mm), utilizzata ad esempio da Tesla Motors.

Le celle prismatiche *[figura 7c]* sono state create in risposta alla necessità di batterie più sottili. Ciò si ottiene mediante stratificazione degli elettrodi e del separatore in un involucro rettangolare. Il materiale dell'involucro solitamente è una plastica resistente. Hanno maggiori costi di produzione.

Le celle a sacchetto (pouch) *[figura 7a]* sono le più performanti e quelle con densità energetica maggiore. Sono costruite come le celle prismatiche, ma sono sigillate all'interno di un sacchetto leggero. L'elettrolita è tipicamente gelatinoso. L'inconveniente di queste celle è la fragilità ed il fatto che possono espandersi durante l'utilizzo, bisogna garantire una maggiore robustezza del pacco batterie e questo generalmente comporta costi superiori.



Figura 7: esempi di celle pouch (a), cilindriche (b), prismatiche (c)

Configurazione:

Gli accumulatori basati su batterie Li-ion sono formati da più moduli in serie, a loro volta formati da singole celle di batterie Li-ion in configurazione serie parallelo, questo per arrivare ad avere le caratteristiche di tensione e di capacità desiderate (come in Fig. 1.17). Un comune pacco batterie è formato da blocchi di 18-30 celle in parallelo, che inseriti in serie ci forniscono la tensione desiderata. Ad esempio con 96 serie si ottiene un pacco da 400V nominali (come tesla model s).

1.2 Regolamento FSAE electric

Durante tutta la fase di ricerca e studio si è sempre fatto capo al regolamento FS Rules Germany, che è derivato dal regolamento FSAE international ed è utilizzato per la competizione tedesca, ma anche nella gran parte delle manifestazioni in Europa (ad esempio FSAE Italy) quindi a tutte le competizioni a cui solitamente il team prende parte. Va specificato che in seguito si farà riferimento al regolamento formula student germany del 2022, il regolamento subisce leggere variazioni ogni anno è quindi consigliabile verificare la versione corrente.

Riporto in seguito le parti del regolamento di maggiore interesse

Definizioni:

EV 1.1.1 Tractive System (TS) – every part that is electrically connected to the motor(s) and TS accumulators.

EV5.1.1 Cell – a battery cell or super-capacitor.

EV5.1.2 Cell Energy – the maximum cell voltage times the nominal capacity of the used cell.

EV5.1.3 TS Accumulator – all cells that store the electrical energy to be used by the TS as a whole.

EV5.1.4 TS Accumulator Container – the container itself, which contains the TS accumulator.

EV5.1.5 TS Accumulator Segments – sub-divisions of the TS accumulator.

T11.1.1 The Low Voltage System (LVS) is defined as: every electrical part that is not part of the TS, see EV1.1.1

Per quanto riguarda i motori

EV 2.1.1 Only electric motors are allowed.

Sono permessi solo motori elettrici quindi no soluzioni ibride o fuel cell, però non vengono date ulteriori restrizioni riguardo la tipologia di motore elettrico. In seguito vedremo che che vengono date invece restrizioni per quanto riguarda la condizioni di esercizio dei motori.

EV 2.1.4 The motor(s) must be connected to the accumulator through a motor controller

L'inverter è quindi necessario ed obbligatorio, non vengono però date restrizione sulla sua scelta .

EV 2.2.1 The TS power at the outlet of the TSAC must not exceed 80 kW.

EV 2.2.2 Regenerating energy is allowed and unrestricted.

EV 4.1.1 The maximum permitted voltage that may occur between any two electrical connections is 600 VDC and for motor controller/inverters internal low power control signals 630 VDC.

I motori devono essere quindi limitati in potenza e il massimo voltaggio permesso è si 600 V in DC. È permessa la frenata rigenerativa, per completare l'endurance è stato analizzato che ci vogliono circa 6 kWh di energia per un veicolo di 280kg (pilota incluso) mal pacco batterie può essere ridotto a circa 4kWh se si usa la frenata rigenerativa su 4 ruote.

Le principali limitazioni per quanto riguarda il pacco batterie invece sono:

EV4.1.1 The maximum permitted voltage that may occur between any two electrical connections is 600 VDC and for motor controller/inverters internal low power control signals 630 VDC.

EV2.2.1 The TS power at the outlet of the TS accumulator container must not exceed 80 kW.

EV5.3.1 All cells which store the TS energy must be enclosed in (an) accumulator container(s).

EV5.3.2 Each TS accumulator segment must not exceed a maximum static voltage of 120 VDC, a maximum energy of 6 MJ, see EV5.1.2, and a maximum mass of 12 kg.

Per quanto riguarda l'accumulatore vale sempre il limite massimo di 600 V in DC e 80 kW di potenza in uscita come precedentemente detto per i motori. È inoltre necessario realizzare un accumulatore modulare dove ogni modulo non può superare 120 V in DC, con energia di massimo 6 MJ e massa di 12Kg. Non vengono date particolari restrizioni per quanto riguarda la tipologia di celle richieste quindi si posso utilizzare celle di qualsiasi tipologia chimica e caratteristica.

Il regolamento FSAE Electric è molto accurato e restrittivo in termini di sicurezza. Tutte le parti a rischio sono protette da sistemi automatici di spegnimento e isolamento adeguatamente ridondati. In particolare i sistemi di sicurezza obbligatori da regolamento FSAE:

• BMS: Il Battery Management System è un circuito obbligatorio che controlla tutti i parametri della batteria (tensione, corrente, temperatura)

• AIRs: L'Accumulator Isolation Relays sono una componente fondamentale nel pacco batterie, sono dei relay capaci a lavorare a tensioni molto alte e servono per scollegare le batterie dal resto del veicolo in caso di funzionamento non regolare. Il regolamento ne richiede almeno due all'interno del pacco batterie.

• IMD: L’Insulation Monitoring Device misura continuamento l’isolamento presente tra il circuito High Voltage dal Low voltage. L’isolamento del circuito ad alta tensione è una parte cruciale e molto ampia del regolamento che non verrà spiegata nel dettaglio in questa tesi.

Da regolamento due circuiti sono elettricamente isolati, se sono vere entrambe le definizioni:

La resistenza di entrambi i circuiti `e ≥500 Ω/V in relazione alla massima tensione del TS, o 250 V, se la tensione del TS `e ≤250 V . La tensione di resistenza tra due circuiti deve essere maggiore di 3 volte quella della massima tensione del TS, o 750 V, se la tensione del TS `e ≤250 V

Tutte le tensioni maggiori di 60 V DC o 25 V AC RMS sono considerate HV

• APPS/Brake Pedal Plausibility Check : Sono sensori relativi ad acceleratore e freno che se misurano valori non plausibili spengono la vettura

• IS: L’Inertia Switch `e un accelerometro che in caso di urto violento invia un segnale di errore ai dispositivi che spengono la vettura e scollegano le batterie

Tutte queste componenti vanno progettate, realizzate e testate dalla squadra e sono chiaramente fondamentali ed obbligatorie per poter prendere parte alle competizioni.

Capitolo2

Powertrain elettrico

2.1 Il motore

Per avere massime performance durate la competizione il motore deve essere in grado di fornire tutta la coppia che si può trasferire in terra, una capacità eccessiva aumenterebbe solo il peso del veicolo mentre una capacità non massima causerebbe prestazioni inferiori. Nella scelta del motore è importante tenere in considerazione i seguenti parametri:

- Potenza nominale: potenza media che i motori posso gestire senza surriscaldamenti eccessivi
- Coppia massima
- Velocità massima
- Tipo di motore: esistono diversi tipi di motori con caratteristiche diverse
- Efficienza
- Distribuzione della potenza: si possono applicare soluzioni con due ruote motrici al posteriore della vettura (RWD) oppure soluzioni con quattro motori elettrici uno per ruota e quindi quattro ruote motrici (4WD)

2.2 Tipologie motori elettrici

I motori elettrici possono essere divisi in due macrocategorie in base a come viene prodotto il campo magnetico: può essere prodotto meccanicamente o tramite corrente elettrica alternata. Da queste categorie poi si può fare un ulteriore differenziazione in base al tipo di rotore e statore che montano. *[figura 8]*

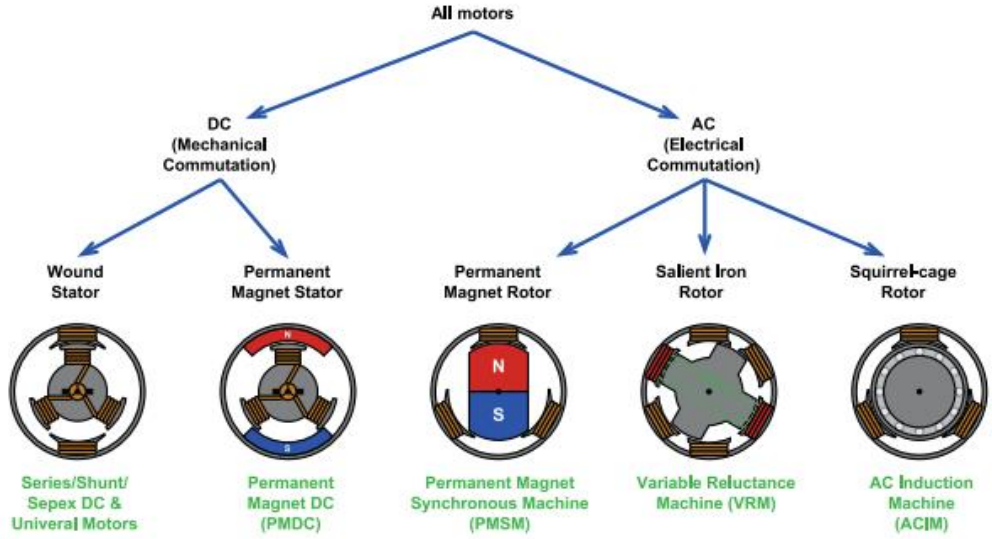


Figura 8: tipologie più comuni di motori elettrici

In seguito sono analizzati cinque tipi di motori:

Motori a corrente continua a magneti permanenti (PMDC) comunemente detti anche motori DC *[figura 9]* sono la tipologia di motori più antichi, utilizzano magneti permanenti nello statore per creare il campo magnetico, il rotore ruota all'interno dello statore ed è formato da avvolgimenti di fili di rame che al passaggio di corrente creano un loro campo magnetico. Il campo magnetico del rotore e dello statore tendono ad allinearsi, è quindi presente anche un commutatore costituito da spazzole che varia continuamente il campo magmatico del rotore modificando l'alimentazione elettrica dei vari avvolgimenti, in questo modo i due campi magnetici non si allineano mai e avrò una rotazione continua. Sono motori relativamente semplici da costruire, l'efficienza è circa del 85-90% con perdite significative legate al commutatore, un altro difetto del commutatore è che le spazzole che lo compongono necessitano di costante manutenzione.

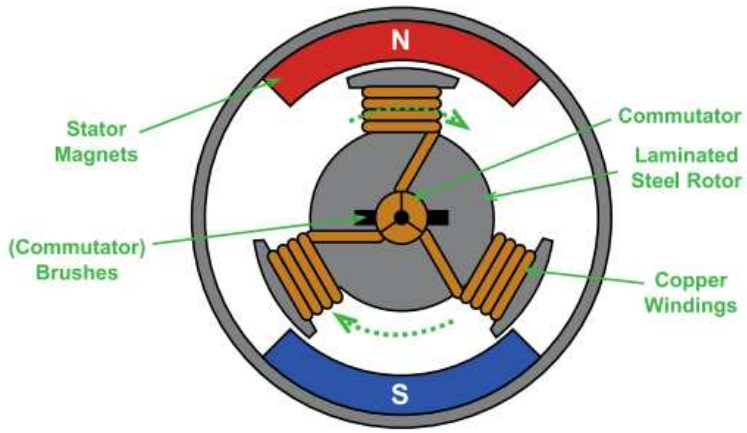


Figura 9: schema tipico motore a corrente continua a magneti permanenti

Motori a corrente continua a doppio avvolgimento (Dual-wound DC Motors) *[figura 10]* hanno un funzionamento analogo ai motori a corrente continua a magnati permanenti ma sia il rotore che lo statore sono formati da avvolgimenti metallici che quando eccitati producono un campo magnetico. Ne esistono diverse tipologie con diverse caratteristiche in base al tipo di metallo degli avvolgimenti. I motori a doppio avvolgimento sono stati storicamente una delle tipologie più popolari e più convenienti, rispetto ai motori PMDC le intensità di campo sono generalmente più elevate, il che si traduce in maggiori forza elettromotrice per unità di corrente, l'efficienza universale è tipicamente intorno all'85-90%, simile ai motori PMDC. Utilizzati anche per applicazioni mobili di grandi dimensioni come i veicoli elettrici.

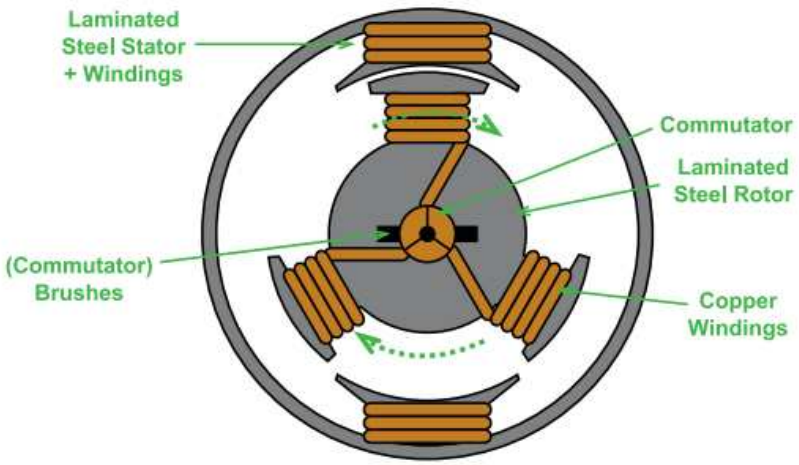


Figura 10: schema tipico motore a corrente continua a doppio avvolgimento

Motori ad induzione (IM) o comunemente detti motori asincroni *[figura 11]* sono motori che lavorano con corrente alternata. Infatti l'avvolgimento dello statore è alimentato da corrente alternata e grazie ad una particolare disposizione si genera un campo magnetico rotante che ruota con la stessa frequenza della corrente di alimentazione. Il rotore segue il campo dello statore ma la sua velocità di rotazione è sempre minore, questa differenza di velocità viene detta slittamento ed è per questo motivo che il motore viene detto asincrono. I motori ad induzione sono relativamente facili da costruire e non avendo il commutatore sono più affidabili e più resistenti rispetto ai motori che abbiamo visto prima che lavorano in corrente continua. Il rendimento è circa del 90-95%. Sono molto diffusi nelle applicazioni industriali dove solitamente lavorano con correnti trifase, è considerato il miglior compromesso tra prestazioni e complessità e così possono essere azionati direttamente dall' alimentazione industriale.

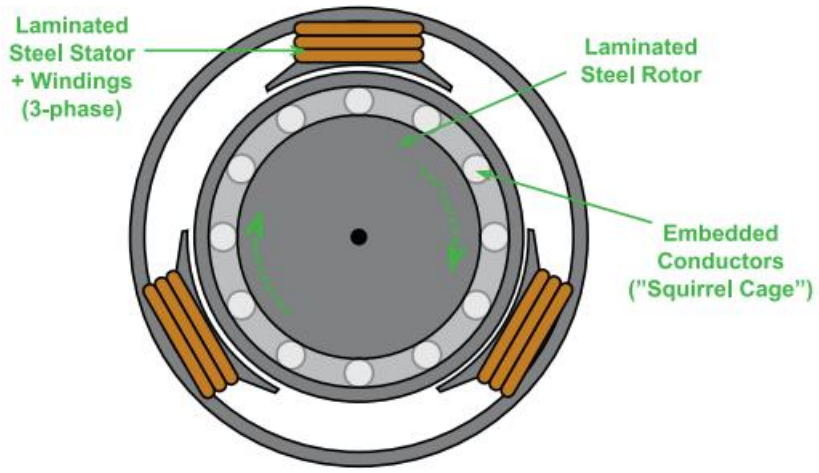


Figura 11: schema tipico motore ad induzione asincrono

Motori sincroni o a riluttanza *[figura 12]* sono costituiti da un rotore che ha diversi poli magnetici alternati, lo statore invece è formato da avvolgimenti metallici che quando alimentati in corrente alternata creano un percorso di flusso magnetico. Il rotore in questo caso avrà la velocità di rotazione sincronizzata con la frequenza elettrica, da questo deriva il nome di motori sincroni. I vantaggi principali che offrono sono la costruzione semplice e robusta, la tolleranza ai guasti e il basso costo. Gli svantaggi sono l'efficienza relativamente bassa (solitamente <90%), l'elevata ondulazione della coppia, il rumore acustico, algoritmi di controllo complessi.

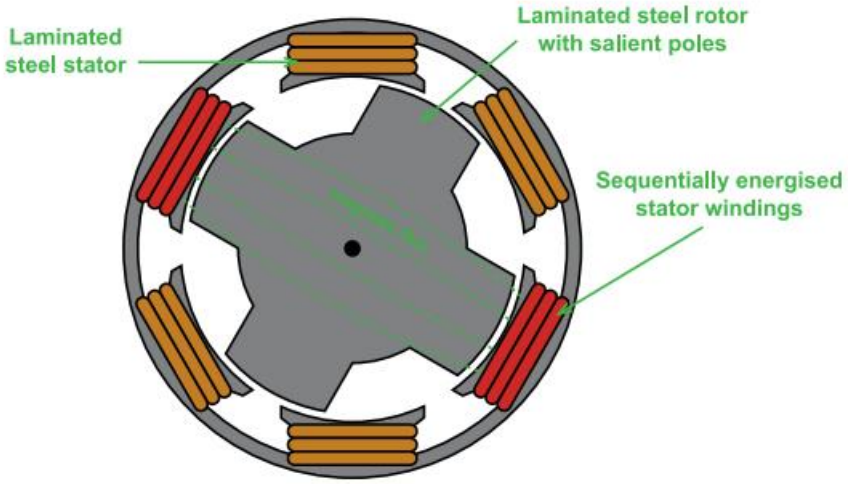


Figura 12: schema tipico motore sincrono a riluttanza

Motori sincroni a magneti permanenti (PMSM) *[figura 13]* sono la tipologia di motori più utilizzata per le vetture elettriche. Lo statore è sempre formato da avvolgimenti metallici mentre il rotore in questo casa è formato da una serie di magneti permanenti, e questo gli conferisce la più alta densità di potenza ed efficienza intorno al 95%, sono quindi la scelta più popolare tra i veicoli elettrici e soprattutto se si ricercano alte performance. La maggiore densità di potenza e il profilo della coppia piatto sono un risultato degli studi e della ricerca che si sta facendo in questi anni sui magneti permanenti.

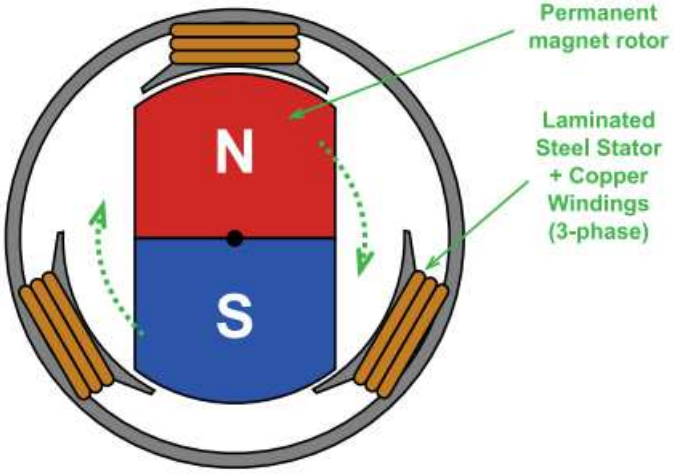


Figura 13: schema tipico motore sincrono a magnati permanenti

La *[figura 14]* mostra un esempio di curva coppia-velocità per un motore ad induzione ed un PMSM dove si può notare che la curva di coppia rimane costante nel PMSM. Un alto vantaggio dei magneti permanenti è che sono in grado di produrre un coppia maggiore a basse velocità, questo perché i magneti producono costantemente campo magnetico invece le spire metalliche di un motore ad induzione devono essere eccitate. Il risultato di ciò è una più alta accelerazione. Il principale svantaggio è l'alto costo dei magneti permanenti infatti negli ultimi anni molti produttori si stanno allontanando dalla costruzione di questi motori, ad esempio Tesla Motors sta investendo molto per riuscire ad utilizzare in maniera performante motori ad induzione. Nonostante ciò i PMSM rimangano la soluzione migliore fino quando non verranno rimpiazzati da valide alternative.

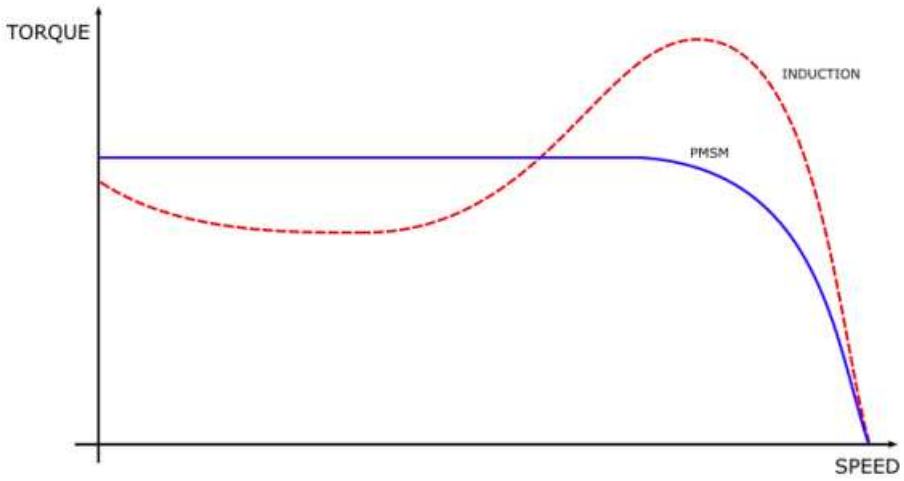


Figura 14: esempio curva coppia velocità per PMSM e motori ad induzione

Tabella 2: confronto tra motori PMSM e motori ad induzione

	PMSM	Motori a induzione
Densità di coppia	Grazie ai magneti permanenti ho una grande intensità del campo magnetico e quindi elevata coppia applicabile. Il profilo coppia-velocità piatto mi dice che la coppia è applicata in maniera costante durante tutto l'intervallo di velocità del motore	Il campo magnetico del rotore deve essere indotto ed è quindi più debole, viene ridotta quindi la coppia massima applicabile. Dal profilo non lineare della coppia si vede che questa è ridotta a basse velocità del motore
Densità di potenza	I magneti permanenti hanno una massa inferiore e sono più compatti pertanto i motori PMSM posso essere montati in spazi stretti come ad esempio nei mozzi delle ruote	Per ottenere la potenza di un PMSM bisogna realizzare motori di dimensioni e massa elevate, diminuendo così la densità di potenza ed il rapporto peso-potenza
Efficienza	L'assenza di perdite nel rotore permettono di avere motori più efficienti, anche il raffreddamento richiesto sarà inferiore e con questo il peso dovuto all'impianto di raffreddamento	Ho elevate perdite energetiche nel rotore dovute al campo magnetico indotto, quindi ho un efficienza complessiva minore
Durabilità	I magneti permanenti sono vulnerabili alle alte temperature e ad elevate vibrazioni. Necessitano quindi di un sistema di controllo sofisticato	La loro semplicità fa si che i motori a induzione siano più robusti dei PMSM
Costo	I magneti permanenti sono composti da metalli rari e particolarmente costosi, andando ad influire significativamente sul costo complessivo del motore	La loro costituzione è semplice e sono composti da materiali ferromagnetici standard. I costi sono ridotti

2.3 Confronto RWD con 4WD

La configurazione del powertrain per un veicolo elettrico e in particolar modo per una vettura formula SAE può essere di diversi modi: ruote motrici posteriori (RWD) sia con un singolo motore con differenziale, cioè una soluzione molto simile alla configurazione di un veicolo con motore a combustione interna, sia con due motori. Un'altra configurazione è quattro ruote motrici (4WD) alimentate da quattro motori elettrici.

La soluzione con motore singolo e differenziale meccanico *[figura 15]* è la più semplice ma molto affidabile. L'algoritmo di controllo del motore è semplice e può al massimo implementare il controllo della trazione.

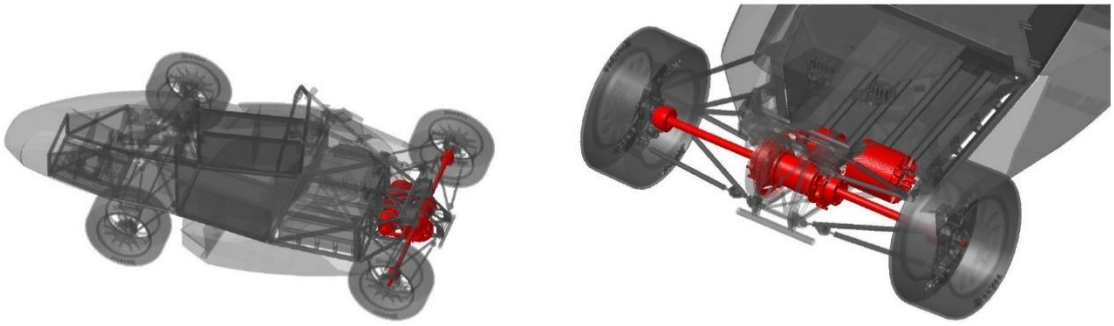


Figura 15: esempio di una macchina con singolo motore elettrico e differenziale al posteriore

La soluzione con il doppio motore *[figura 16]* è un ottimo compromesso tra complessità e prestazioni, permette di eliminare le perdite per attrito del differenziale meccanico ma obbliga la definizione di un algoritmo di controllo della ripartizione della coppia tra i motori.

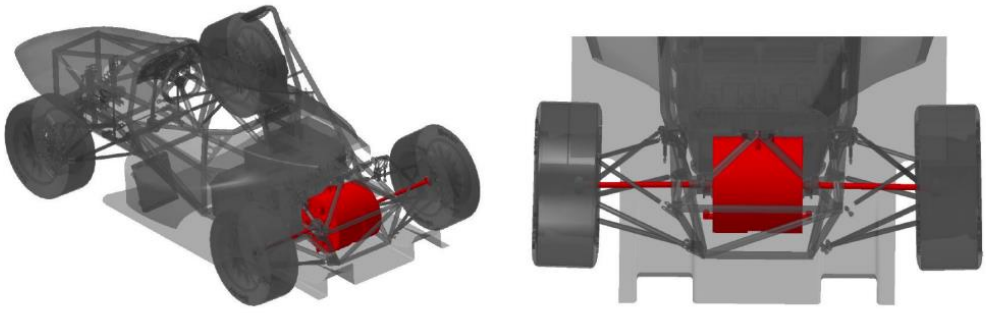


Figura 16: esempio powertrain composto da doppio motore elettrico al posteriore

L'ultima soluzione *[figura 17]* è quella di una trazione integrale con quattro motori, avrò alte prestazioni, bassi consumi con frenata rigenerativa, ottima ripartizione dei pesi ma anche un progetto molto complesso e lungo nella parte meccanica, hardware e software.



Figura 17: schema powertrain di una vettura elettrica FSAE 4WD

Per confrontare i vantaggi della trazione integrale rispetto alla trazione posteriore, verranno analizzati i seguenti punti:

• Dinamica del veicolo utilizzando il modello degli pneumatici

• Implementazione del torque vectoring

• Implementazione del controllo della trazione

Le forze di reazione create dagli pneumatici sono complesse in quanto non sono esclusivamente proporzionali al carico verticale, fattori legati all'area di contatto del pneumatico, come ad esempio pressione e larghezza, hanno un grande effetto sulle forze generate. Tuttavia, per semplicità, durante l'analisi si userà il modello di Coulomb semplificato in cui le forze di attrito longitudinale e laterale di un pneumatico sono rispettivamente:

$$Fx = \mu x Fz$$

$$Fy = \mu y Fz$$

dove Fx e Fy sono le forze di attrito longitudinale e laterale, μx e μy sono i coefficienti di attrito longitudinale e laterale e Fz è la forza di carico verticale sul pneumatico. Assumendo che l'attrito rimane costante e la sensibilità al carico del pneumatico viene ignorata, le forze di attrito in entrambe le direzioni possono essere considerate proporzionali alla forza di carico verticale.

Consideriamo il caso di due auto da corsa quasi identiche, dove l'unica caratteristica distintiva è che una è 4WD e l'altra RWD, durante l'accelerazione la distribuzione del peso delle vetture viene spostata all'indietro, aumentando la forza di carico verticale, e quindi aderenza, sulle gomme posteriori e riducendo la forza delle gomme anteriori. La quantità di potenza che potrà essere applicata attraverso le gomme posteriori di entrambe le vetture sarà identica; tuttavia, l'auto 4WD avrà prestazioni migliorate perché può applicare potenza motore aggiuntiva attraverso i pneumatici anteriori. Gli pneumatici sono l'unica forma di contatto tra un'auto da corsa e la pista, si può quindi affermare che un propulsore 4WD può applicare più potenza rispetto ad un equivalente a trazione solo posteriore perché massimizza l'utilizzo della trazione disponibile scaricandola su quattro pneumatici al contrario di due.

Un analisi particolarmente esaustiva sulla dinamica del veicolo considerando la differenza tra RWD e 4WD è stata fatta dall'università di Chalmers, Goteborg, Svezia nel 2013. Qui in seguito sono riassunti e commentati i risultati ottenuti da quel gruppo di lavoro per la loro auto elettrica ma sono importanti da analizzare perché hanno validità generale per qualsiasi team di formula SAE. Lo studio è stato effettuato dividendo la dinamica del veicolo in tre parti: dinamica longitudinale, laterale e verticale.

Dinamica verticale. Quando si analizza l'accelerazione in rettilineo ci sono altri fattori oltre alla pura aderenza degli pneumatici e alla potenza del motore da tenere in considerazione. Il peso si sposta all'interno dell'auto dando agli pneumatici un'aderenza disuguale; questo determina la quantità di coppia che può essere applicata alle diverse ruote. Si è studiato come le diverse masse molleggiate/ non molleggiate influiscono sulle prestazioni dell'auto. L'obiettivo è valutare se i quattro motori montati sulle ruote sono

una buona alternativa al motore montato sul telaio, nonostante l'aumento della massa non sospesa. Nella loro vettura ogni motore ha una massa stimata di 10 kg. La massa della carrozzeria è di 270 kg con i motori montati nel telaio e quindi una massa di 250 kg quando i motori sono montati nelle ruote ipotizzando 2 motori (RWD). La massa della ruota è considerata come massa non sospesa e la massa di 1/4 della carrozzeria è considerata come massa sospesa.

Il team dell'università di Chalmers ha realizzato tre modelli matematici per analizzare la dinamica verticale da differenti prospettive. Il primo modello studia il tempo di risposta del telaio quando un veicolo colpisce delle irregolarità della pista. Il secondo modello studia la frequenza e il tempo di stabilizzazione del telaio e della ruota (potrebbe dimostrare ad esempio sterzata da parte del guidatore o un beccheggio durante l'accelerazione/frenata). Il modello 3 è stato realizzato per analizzare le forze normali tra pista e pneumatico. La forza normale è come visto importante per la trazione. I risultati dei modelli 1 e 2 ci dicono più sul movimento del telaio piuttosto che sulla relazione tra massa non sospesa e trazione, come invece fa il modello numero 3.

Dinamica verticale

Modello 1: Il primo risultato di interesse come si può vedere in *[tabella 3]* è che una massa non sospesa elevata influisce sul tempo di risposta delle irregolarità della strada al telaio, la variazione della massa non sospesa non ha alcun effetto critico sul movimento del telaio.

Tabella 3: risultati modello 1, dinamica verticale

Masse non sospese [Kg]	Masse sospese [Kg]	Tempo stabilizzazione [s]	Massima ampiezza [mm]	Minima ampiezza [mm]
13	67.5	1.75	12.6	-2.68
23	6.2	1.71	12.7	-2.72

Il modello verticale numero 2 analizza il movimento e la risposta del telaio e della ruota quando il telaio e quindi quando anche l'ammortizzatore viene spinto verso il basso per 10mm e poi rilasciato. La *[tabella 4]* mostra che il corpo si stabilizza più rapidamente con massa non sospesa più pesante come è logico che sia, notare comunque che i risultati della *[tabella 4]* sono relativamente simili. Infine il terzo modello matematico va ad

Tabella 4 : risultati modello 2, dinamica verticale

Masse non sospese [Kg]	Masse sospese [Kg]	Parte veicolo	Tempo stabilizz. [s]	Massima ampiezza [mm]	Minima ampiezza [mm]
13	67.5	Telaio	0.5852	0.721	-10
13	67.5	Ruota	0.5291	0.612	-1.18
23	62.5	Telaio	0.5728	0.625	-10
23	62.5	ruota	0.5032	0.575	-1.12

analizzare la forza normale tra ruota e strada nelle stesse condizione del caso due, cioè con un abbassamento del telaio di 10mm. I risultati sono riassunti nella *[tabella 5]* e come si può vedere una bassa massa non sospesa fa sì che le ruote si adattino e seguano meglio la strada. L'adattabilità si traduce in un'aderenza soddisfacente che è necessaria per trasferire la potenza dai motori al suolo e per mantenere la trazione in curva ad alta velocità.

Tabella 5 : risultati modello 3, dinamica verticale

Masse non sospese [Kg]	Masse sospese [Kg]	Tempo stabilizz. [s]	Massima forza normale [N]	Minima forza normale [N]
13	67.5	0.021	1977	200
23	62.5	0.035	1624	200

Dinamica longitudinale

Lo studio della dinamica longitudinale permette di determinare la differenza di accelerazione tra 4WD e RWD e il trasferimento del carico durante l'accelerazione e la decelerazione. È stata simulata la prova di acceleration *[figura 18]* confrontando le prestazione di una soluzione RWD con 4WD, dalla *[tabella 6]* si può notare che la trazione integrale è più veloce di 0.38 secondi e questo porterebbe ad un guadagno di 17 punti. L'ipotesi è che i motori, i riduttori e i controller di un auto a trazione integrale ne aumentano il peso complessivo di circa 25 Kg ma con la trazione integrale si ha un

guadagno in termini di accelerazione sfruttando la trazione delle ruote anteriore che invece non sono utilizzate nel caso RWD.

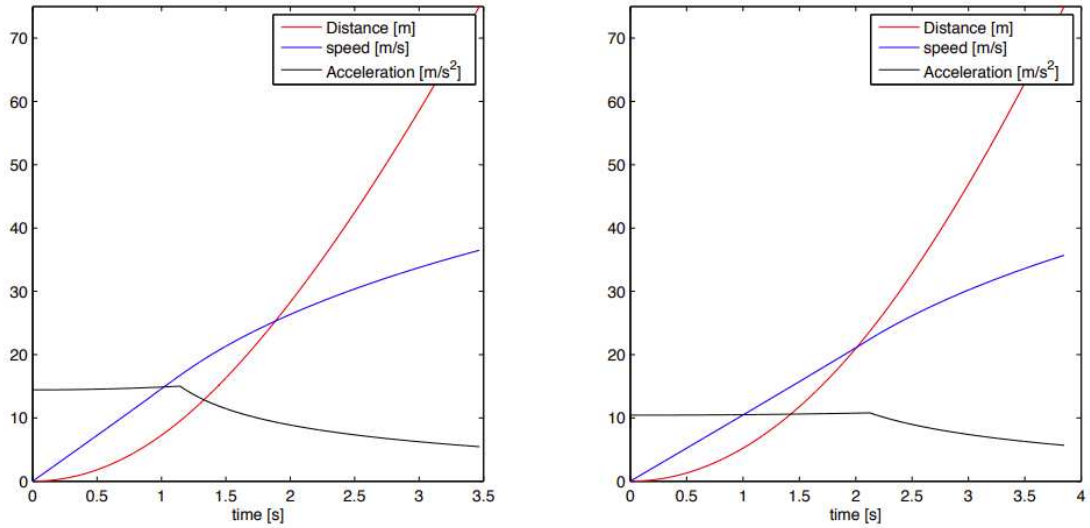


Figura 18 : distanza, velocità, accelerazione per 4WD (a) e 2WD (b)

L'errore che può avere questo studio è quello di avere utilizzato un modello di pneumatici base, infatti con questo modello l'aderenza aumenta linearmente con la forza e, si è considerato che l'attrito sia uguale su ciascuna ruota, in questo modo i risultati sono meno accurati e anche l'efficienza del sistema è stata approssimata.

Tabella 6: risultati modello longitudinale

	2WD	4WD
Massa [KG]	293	318
Tempo [s]	3.85	3.47
Velocità massima [Km/h]	128.5	131
Coppia all'anteriore [Nm]	0.00	223
Coppia al posteriore [Nm]	429	460
Potenza massima [kW]	85	85
Max distribuzione posteriore	0.73%	0.81%

Dinamica laterale

È stato fatto un modello del veicolo in OptimumLap per simulare i tempi sul giro per gli eventi di autocross, endurance, skid-pad, e acceleration e capire quale tra 4WD e RWD fosse la soluzione migliore. Dal modello è poi possibile analizzare quale configurazione permette di raggiungere la velocià massima in curva, nelle prove di endurance e autocross sono simulate curve di differente raggio, e anche analizzare gli efffetti del trasferimento di carico. Per la creazione del modello OptimumLap sono stati utilizzati i seguenti parametri: massa, ruote motrici, coefficiente di resistenza aerodinamica, coefficiente di deportanza, area frontale, densità dell'aria, raggio del pneumatico, resistenza al rotolamento, attrito longitudinale, attrito laterale, dati del motore, tipo di trasmissione, rapporti di trasmissione, efficienza. Per i seguenti dati il team di Chalmers ha utilizzato i parametri della loro precedente auto a benzina modificando poi opportunamente alcuni parametri secondo le caratteristiche dell'auto elettrica.

Semplificazioni e ipotesi: questo modello non include il trasferimento del carico laterale; ciò significa che non è possibile vedere le diverse forze normali sulla ruota destra e sulla ruota sinistra durante la curva, è stato usato un modello semplificato di pneumatico. Inoltre, non tiene conto del leveraggio della sospensione e della geometria delle ruote e l'effetto del pacchetto aerodinamico.

La trazione integrale consente di ottenere tempi migliori in tutti gli eventi rispetto all'auto senza trazione integrale vedi *[tabella 7]*

Tabella 7: risultati modello OptimumLap

Tempi al giro				
4WD/RWD	Autocross [s]	Endurance [s]	Acceleration [s]	Skid-pad [s]
4WD	69	77	3.9	4.77
RWD	72	82	4.7	4.77
4WD (+25 Kg)	70	78	4.1	4.77

Questi risultati sono stati ottenuti sia quando si è considerato lo stesso peso per l'auto 4WD e RWD sia quando sono stati aggiunti 25 Kg sulla soluzione 4WD per considerare il peso dei motori aggiunti. Naturalmente i tempi sul giro sono diversi ma rimangono comunque superiori. L'auto a 4 ruote motrici è significativamente più veloce di quella a trazione integrale, soprattutto in accelerazione, anche con 25 kg di peso in più aggiunti, ma continua a superare l'auto RWD anche negli altri eventi.

Torque Vectoring

Molte delle macchine commerciali oggi hanno sistemi di anti slittamento solitamente chiamati come traction control system (TCS) o controllo dinamico della stabilità. Il sistema rileva quando la macchina è in sovra o sotto sterzo e quindi applica un freno a una o più ruote per mantenere il controllo anche nel caso che il pilota volesse aumentare la velocità. Utilizzando un sistema di torque vectoring (TV) è possibile ottenere il controllo della vettura aumentando la velocità invece di frenare, ad esempio applicando una coppia maggiore alle ruote esterne quando l'auto è in curva, in questo modo la macchina girerà più velocemente e con un minore angolo di sterzo.

Il principio alla base del torque vectoring è aumentare la coppia sulle ruote esterne e diminuire la coppia sulle ruote interne durante una curva. Il peso del veicolo si sposterà durante la curva, in modo tale che vi sia una forza normale maggiore sugli pneumatici esterni rispetto a quelli interni in modo analogo a quanto succede nei pneumatici posteriori durante l'accelerazione. Ciò crea una maggiore presa laterale consentendo di applicare più coppia sui motori esterni prima che si perda la trazione. Se si applica la stessa coppia a entrambe le ruote, ma in assenza di TV o differenziale intelligente la ruota interna perderà trazione e inizierà a slittare prima della ruota esterna. Questo porta alla situazione in cui la trazione della ruota esterna non viene sfruttata al massimo e la ruota interna non utilizzerà gran parte della sua trazione per contrastare le forze in curva. Lo scopo del TV è quindi massimizzare la coppia che può essere applicata a tutte e quattro le ruote, per curve di qualsiasi raggio, senza perdere trazione. Vedi *[figura 19]*

Al momento dell'entrata in curva il pilota girerà il volante in direzione della curva e il sistema di TV applicherà una coppia maggiore alle ruote esterne e una coppia frenante

alle ruote interne, poi quando l'auto sta percorrendo la curva sono in una condizione stazionaria dove il raggio di curvatura ed il tasso di imbardata rimangono costanti. Infine in uscita curva la coppia che avrò sui motori sarà l'opposto di quando avevo ad inizio sterzata, la coppia sulle ruote esterne diminuirà e aumenterà quella sulle ruote interne per ottimizzare l'inversione della direzione di imbardata.

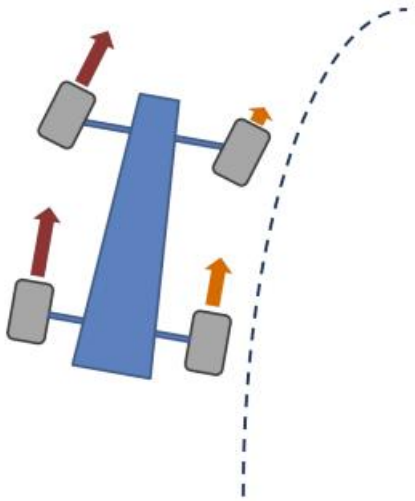


Figura 19: veicolo con TV in curva, la coppia di ogni ruota è rappresentata dalle frecce

Il TV è controllato attraverso dati forniti da tachimetro e accelerometri, il tachimetro determina la forza di deportanza del pacchetto aerodinamico mentre gli accelerometri sono utilizzati per calcolare gli spostamenti di peso dell'auto quando la vettura subisce le forze laterali e longitudinali in curva. Sono possibili altri modi di controllare il sistema ad esempio misurare la forza nelle molle e negli ammortizzatori, l'essenziale è ottenere sufficienti dati per calcolare la forza normale sui pneumatici e quindi poter calcolare un modello di aderenza.

Dallo studio della letteratura è emerso chiaramente che la trazione integrale con TV è il sistema di guida con le prestazioni più elevate, ma anche che la trazione integrale senza TV offre comunque prestazioni più elevate rispetto alla trazione RWD.

Conclusioni e raccomandazioni

Questa sezione riassume i principali vantaggi e svantaggi della RWD e della 4WD. Nella simulazione dell'evento di accelerazione un'auto RWD ha concluso la gara in 3,85 secondi e avrebbe ottenuto un punteggio di 67 punti nell'evento FS EV Germany. Il limite di potenza massima di 85 kW viene raggiunto a 81 km/h e la velocità massima raggiunta è di 129 km/h. La coppia possibile che può essere applicata al suolo è limitata dalla trazione degli pneumatici. Il torque vectoring può essere applicato a un sistema RWD e aumenterebbe le prestazioni del 21% rispetto a un sistema RWD senza torque vectoring. Nella simulazione dell'evento di accelerazione, il veicolo 4WD ha concluso la gara in 3,47 secondi e avrebbe ottenuto un punteggio di 74 punti nell'evento FS EV Germany. Il limite di potenza di 85 kW è stato raggiunto a 60 km/h. Il torque vectoring può essere applicato a un sistema 4WD e aumenterebbe le prestazioni dell'11% rispetto alla normale trazione integrale. Con i sistemi TV le prestazioni sono più elevate quando l'auto esce da una curva. Il sistema RWD con TV è solo il terzo migliore, il che significa che la trazione integrale è un'opzione migliore con o senza TV. Le prestazioni dei vari sistemi sono elencate nella *[tabella 8]*

Tabella 8: prestazioni tipologie powertrain

Powertrain	Capacità di accelerazione longitudinale e laterale
4WD con TV	Migliori performance
4WD	-10% performance
RWD con TV	-20% performace
RWD	-34% performance

Capitolo 3

AMK Racing Kit

3.1 Scelta del Kit

La scelta del motore è stata la prima decisione da prendere perché in base alle caratteristiche del motore si procederà poi con la progettazione di tutte le altre parti della vettura, in particolar modo il design del pacco batterie e strettamente legato alle caratteristiche del motore.

Per la nostra vettura è stato scelto un kit di motori prodotti da AMK appositamente per le competizioni Formula SAE, *[figura 20]* questa scelta è stata fatta sia perché si tratta di una delle più preformanti ed utilizzate, sia per la loro semplicità di utilizzo. Il kit da corsa FSE è un sistema completo che è stato adattato per soddisfare le squadre FSAE e include:



Figura 20: AMK Racing Kit

• Un inverter AMKASYN KW26-S5-FSE-4Q

• Quattro servomotori sincroni DD5-14-10-POW

• Software di avvio AMK AIPEX Pro

• 100 ore di supporto tecnico

Innanzitutto il kit si presenta come un prodotto completo in cui motori e inverter hanno compatibilità garantita, solitamente infatti inverter e motori hanno produttori diversi e poiché ogni produttore sviluppa i propri prodotti in maniera indipendente non è detto che ci sia una compatibilià tra i due. Generalmente quando si valuta l'acquisto del motore vengono consigliati della casa produttrice degli inverter adatti, un esempio che era stato preso in considerazione sono i motori Emrax controllati da un inverter Unitek, ma anche in questo caso sarebbe stato comunque necessario da parte nostra un lavoro maggiore per ottimizzare la compatibilità tra i due prodotti. Qualsiasi tempo impiegato per risolvere i problemi di compatibilità sarebbe stato inaccettabile data la grande mole di lavoro che si sarebbe aspettata nella progettazione e realizzazione della nostra prima vettura elettrica e pertanto questo è stato evitato con il Kit AMK FSE Racing.

Il secondo e importantissimo vantaggio che comporta questo kit riguarda le prestazioni e la sicura idonetà alle regole stringenti della Formula SAE. Infatti questo kit è già utilizzato da molti team in tutto il mondo, anche diversi tra i più importanti team come ad esempio: Team Delft e il Green Team Uni Stuttgart che attualmente sono rispettivamente 2° e 6° nella classifica mondiale FSE, o in italia il Politecnico di Torino. Il team GreenTeam Uni Stuttgart ha inltre recentemente stabilito il record mondiale di auto elettrica con l'accelerazione più rapida dimostrando così ancora una volta che questo kit ha prestazioni di primissimo livello.

3.2 motore

Il DD5-14-10-POW raffigurato nella [figura 21] è un motore sincrono a magneti permanenti a 10 poli. Le specifiche principali del motore sono le seguenti:

Tabella 9: specifiche motore

Massa	3,55 Kg
Coppia nominale	9.8 Nm
Coppia massima	21 Nm

Potenza nominale	12,3 kW
Velocità nominale	12000 rpm
Velocità massima	20000 rpm
Voltaggio nominale	350 V
Corrente nominale	41 A

Il motore DD5 viene fornito da AMK con un cavo trifase schermato da 300 collegato con l'inverter. La posizione del rotore e altri dati sono inviati all'inverter tramite un connettore, ad esempio la temperatura del motore viene misurata da un termistore KTY, anch'esso inviato all'inverter tramite il connettore M12.

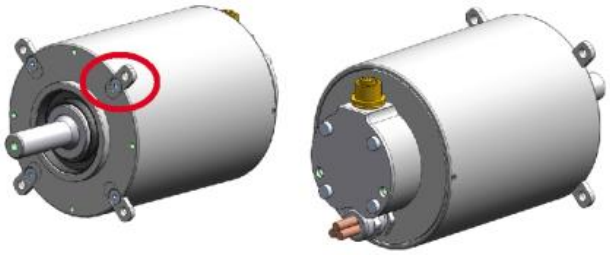


Figura 21: motore AMK Racing Kit

Il raffreddamento dei motori avviene per conduzione termica attraverso l'alloggiamento in alluminio e per aumentare il trasferimento di calore AMK ha consigliato l'uso di una camicia di raffreddata ad acqua come mostrato in [figura 22].

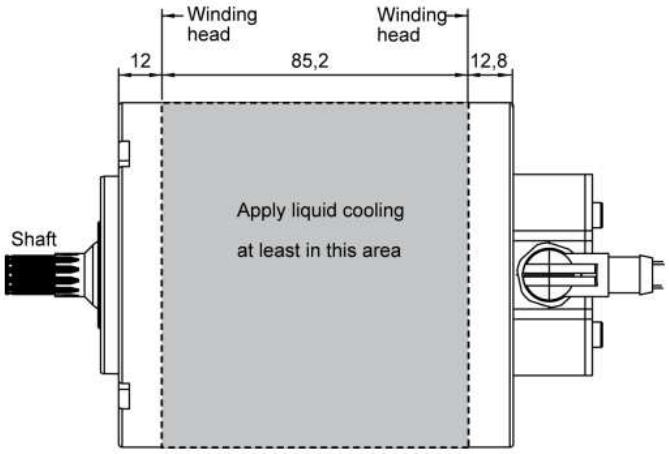


Figura 22: schema raffreddamento motore

La *[figura 23]* è un estratto della scheda tecnica che mostra le curve prestazionali del motore. Le curve arancioni rappresentano rispettivamente la coppia e la potenza continue in ciascun grafico, mentre le curve blu rappresentano la prestazione di picco (limitata dall'inverter a un massimo di 1,24 secondi). Le curve tratteggiate rappresentano le prestazioni del motore con indebolimento di campo, cioè quando l'inverter inietta a corrente di magnetizzazione negativa per opporsi e ridurre l'intensità del campo magnetico del rotore.

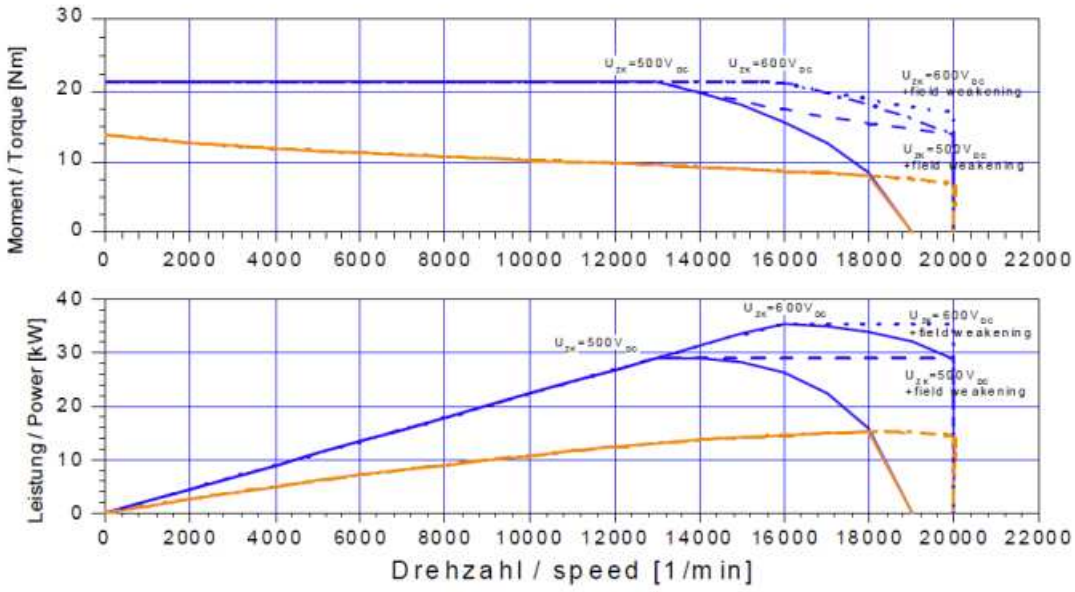


Figura 23: curve caratteristiche motore

Le curve prestazionali della *[figura 23]* sono mostrate solo per una tensione di alimentazione di 600 V dc e 500 V dc ma la tensione si ridurrà più lo stato di carica si esaurisce e quindi anche la trazione che può esercitare il gruppo propulsore. Ciò non solo riduce la velocità massima del motore (supponendo che non vi sia indebolimento di campo), ma riduce anche la potenza di uscita del motore. Come si può vedere dai grafici di *[figura 24]* e *[figura 25]* mostrano le curve di prestazione adattate alle diverse tensioni di alimentazione. Ciò è stato ottenuto ridimensionando le curve precedenti in base alla velocità teorica a vuoto e quindi ricalcolando la potenza di uscita.

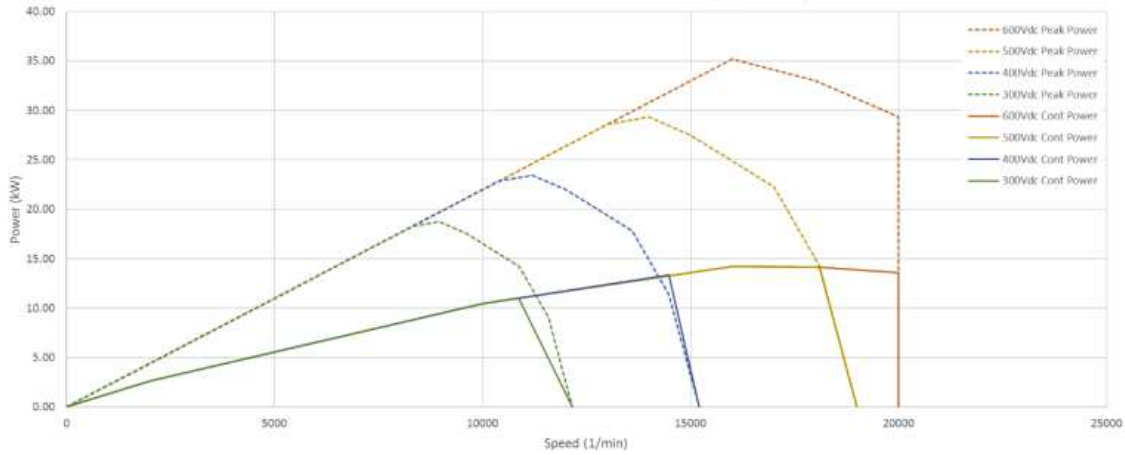


Figura 24: potenza di picco e continua per vari voltaggi

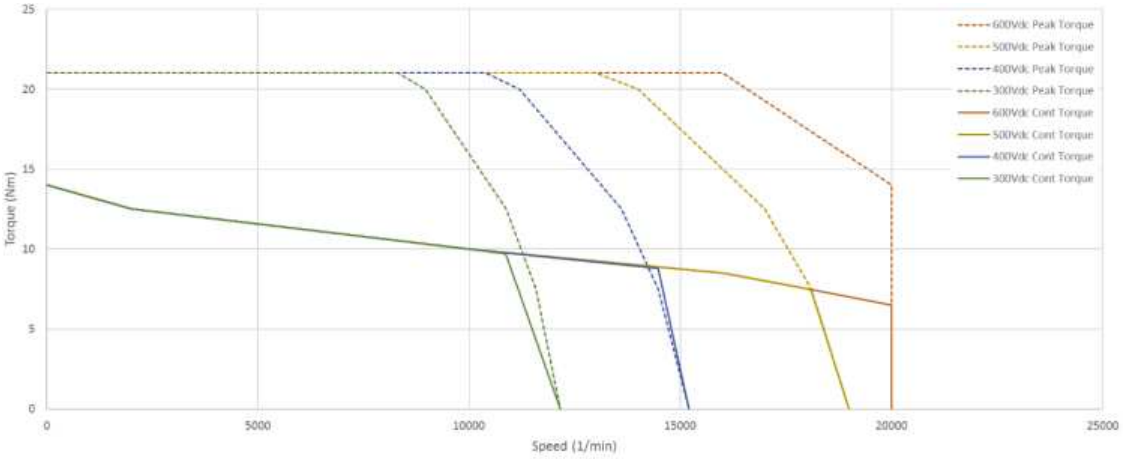


Figura 25: coppia di picco e continua per vari voltaggi

Come mostrato dalle nuove curve la potenza di picco in uscita del motore viene significativamente ridotta quando la tensione di alimentazione diminuisce. La potenza di picco in uscita a 300 V dc è di 18,8 kW, ovvero il 53% della potenza di picco potenza a 600 V dc (35,2 kW), tuttavia, la potenza massima continua a 300 V dc (11 kW) è solo l'81% della potenza massima continuativa a 600 V dc (13,6 kW).

La coppia a bassa velocità del motore non è influenzata dalla tensione di alimentazione, e consentirà quindi al veicolo di accelerare alla stessa velocità teorica indipendentemente dallo stato di carica della batteria. Si può vedere nella Figura 3.4, tuttavia, che il knee-point del motore si riduce proporzionalmente alla tensione di alimentazione.

È stato effettuato inoltre un confronto tra quattro motori DD5 AMK cioè un propulsore 4WD, e dei motori Emrax 228, cioè una propulsore RWD che è stata un'altra possibile opzione presa in considerazione per la nostra vettura.

Il motore Emrax 228 *[figura 26]* ha una velocità massima di 5000 giri al minuto, notevolmente inferiore a quello dei motori AMK ma, per fornire un confronto approssimativo ma comunque significativo le velocità massime dei motori sono state abbinate specificando i rapporti di trasmissione da utilizzare. La potenza del motore non è un metodo valido di confronto tra i motori in quanto le norme FSAE la impongono ad un massimo di 80 kW. Si noti che il confronto ha ignorato l'efficienza dei motori (poiché sono molto simili) e ha dato per scontato che le perdite nell'elettronica associata e nella trasmissione siano trascurabili. I risultati della *[figura 27]* mostrano che il propulsore AMK ha una coppia di avviamento di picco superiore del 40% rispetto al motore Emrax, il propulsore AMK fornisce inoltre una coppia maggiore rispetto al motore Emrax fino al punto in cui entrambi i propulsori diventano a potenza limitata.



Figura 26: foto motore Emrax 228

In termini di prestazioni del veicolo, un'auto da corsa con un propulsore 4WD AMK avrà un'accelerazione maggiore rispetto a un'auto simile alimentata da un Emrax 228 sebbene quattro motori DD5 pesino il 15% in più rispetto alla soluzione con gli Emrax 228 (rispettivamente 14,2 kg rispetto a 12,3 kg). Questo ci fa capire che è preferibile utilizzare la soluzione AMK per avere migliori prestazioni.

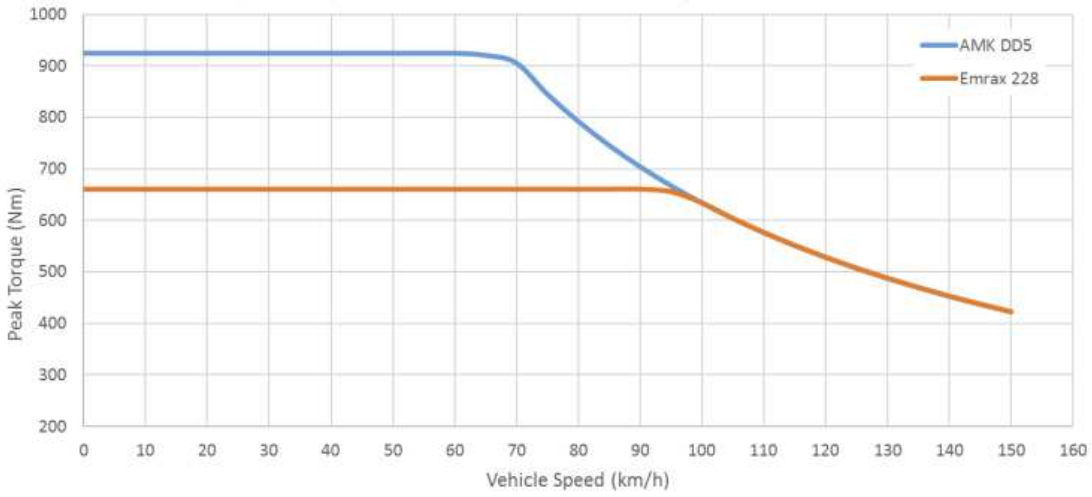


Figura 27: curve di coppia per motori AMK ed Emrax

3.3 inverter

L'inverter incluso nel kit è formato da quattro moduli separati, ciascuno di loro pilota un motore del veicolo. Questo tipo di inverter risulta particolarmente semplice da integrare nel veicolo: innanzitutto grazie la sua predisposizione a lavorare con i motori dello stesso kit, ma altrettanto per la sua praticità di comunicazione con il resto della macchina (tramite il protocollo CAN bus).

La *[figura 28]* è un modello CAD dell'inverter KW26-S5-FSE 4Q che mostra i componenti assemblati, gli inverter sono montati su una piastra di raffreddamento raffreddata a liquido. Da qui in poi chiameremo inverter il blocco unico ed un singolo inverter all'interno dell'assieme verrà definito sub-inverter.

I componenti principali etichettati nella *[figura 28]* sono i seguenti:

- C1, C2, C3, C4 – Le schede controller KW-R06 per ciascun sub-inverter.
- P1, P2, P3, P4 – I circuiti elettronici di potenza per ciascun subinverter.
- SL – La scheda di alimentazione e logica per ciascuna metà dell'inverter. Ciascun sub-inverter deve essere alimentato a 24 V dc.

- CB – La tavola trasversale per ciascuna metà dell'inverter, che costituisce il collegamento fisico tra le schede controller.
- I1, I2, I3, I4 - L'assemblaggio della scheda controller e dell'elettronica di potenza per ciascun sub-inverter.

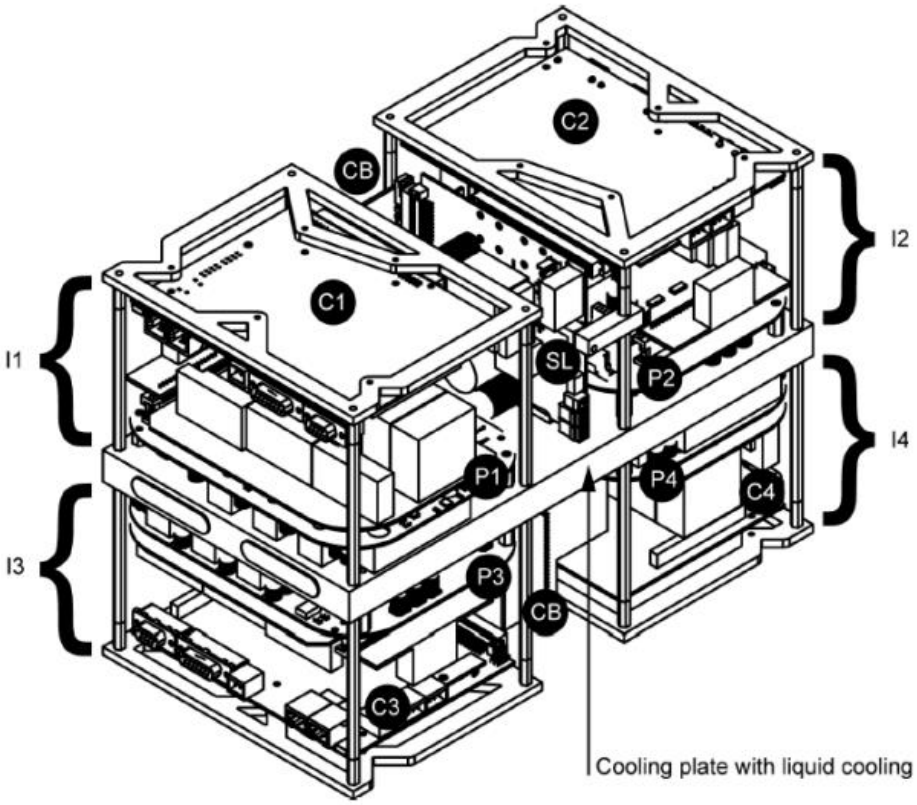


Figura 28: disegno inverter

I parametri del motore ad esempio velocità del motore e temperatura l'inverter quindi controlla il motore tramite il controllo della velocità. Nella [tabella 10] sono riassunte le principali caratteristiche dell'inverter.

Tabella 10: caratteristiche inverter

Range di tensioni in entrata	250 - 720 V dc
Corrente in entrata (a 540 V dc)	48 A

Range di tensioni in uscita	160 – 490 V ac
Potenza nominale in usita	26 KVA
Corrente nominale in uscita	43 A
Corrente di picco in uscita	105 A (per 10 sec)
Efficienza	98%
Comunicazione	CAN bus 2.0

Conclusioni

Grazie a questo studio riguardante il powertrain per una vettura elettrica di Formula SAE siamo arrivati all'acquisto del kit motori e inverter per la nostra prima vettura elettrica. Crediamo che la scelta fatta sia la migliore per le esigenze della squadra perché si tratta di un kit ready to go appositamente progettato per la formula SAE e dalle grandissime prestazioni. La squadra quindi per i prossimi anni può impiegare tutto il tempo e le energie per la progettazione delle altre parti del veicolo non dovendosi preoccupare né della progettazione e controllo dei motori né della loro affidabilità in pista. Il kit inoltre ha una lunga vita utile e questo sia grazie alle performance di primo livello ma anche grazie alla possibilità, in futuro, di implementare frenata rigenerativa e torque vectoring.

Il prossimo step per il Polimarche Racing Team sarà quello di procedere con il design del pacco batterie perché strettamente influenzato da quelli che sono i parametri in ingresso richiesti da motori e inverter. Bisognerà definire il tipo di chimica e la tipologia di celle poi procedere con il design del pacco batterie prestando attenzione alle ristrettive norme di sicurezza del regolamento sia per quanto riguarda la parte meccanica di isolamento e resistenza agli urti, sia per la parte elettronica.

Per le altre componenti della vettura riguardanti le parti di dinamica, telaio, aerodinamica, la squadra può contare su tutte le conoscenze acquisite negli anni di vetture a combustione, queste conoscenze vanno utilizzate e convertite per il design di una vettura elettrica.

Solo in un secondo momento, ancora realisticamente molto lontano negli anni, si potrà pensare di progettare e realizzare motori ed inverter self-made che sono sicuramente la soluzione migliore perché in grado di adattarsi completamente alle specifiche richieste dal team e dalla vettura.

Appendice A

Confronto tra i Tractive Sistem delle monoposto EV della competizione FSG 2019

Team	n.motori	Potenza[kW]	Max voltage[V]	Capacity[kWh]
AMBERG (DE)	4	35.4	600	7.98
AACHEN (DE)	4	32	600	7.02
BARCELLONA (ES)	4	35.36	600	7.14
BAYREUTH (DE)	4	35	588	6.84
BERLIN (DE)	2	36	588	6.52
BRAUNSCHWEIG (DE)	2	35	600	7
CHEMNITZ (DE)	1	75	452	7.24
DARMSTADT (DE)	4	52	443	5.8
DRESDEN (DE)	4	35	588	6.8
EINDHOVEN (NL)	4	30	400	7.0
FREIBERG (DE)	2	50.7	395	6.88
GÖTTINGEN (DE)	1	80	454	7.52
HELSINKI (FI)	2	37	598	7.03
JINZHOU (CN)	2	80	504	7.28
KARLSRUHE (DE)	4	26.7	600	7.34
KASSEL (DE)	4	41	600	12
KIEL (DE)	4	35	600	6.5
LAUSANNE (CH)	1	100	600	8.65
LEMGO (DE)	2	60	600	6.4
LEUVEN (BE)	4	37	600	5.5
LISBOA-1 (PT)	1	100	400	7.9
LISBOA-2 (PT)	4	35	600	7.98
LIUZHOU (CH)	1	75	436	7
LJUBLJANA (SI)	2	70	450	8.8
MADRID (ES)	4	27.3	580	7.15
MANNHEIM (DE)	2	80	504	6.39
MUMBAI (IN)	1	80	470	9.87
MÜNCHEN (DE)	4	35	600	7
NEW DELHI (IN)	2	36	100	8.87
PADOVA (IT)	4	35	596	6.7
RAVENSBURG (DE)	4	41	403	7.62
SANKT AUGUSTIN (DE)	4	36.8	600	7.78
SCHWEINFURT (DE)	1	100	587	7.75
SEVILLA (ES)	1	100	450	6.75
STUTTGART (DE)	4	34.5	600	7.55
TERRASSA (ES)	4	35	588	7.76
THESSALONIKI (GR)	2	55	357	7.46
TRONDHEIM (NO)	4	35.3	600	6.8
WOLFENBÜTTEL (DE)	4	34	600	7.14
ZÜRICH (CH)	4	37	546	6.35

Appendice B

DATASHEET Motori DD5-14-10-POW

Motor-Datenblatt *motor data sheet*

AMK

Bezeichnung/name	**DD5-14-10-POW** - 18600-B5	Formula Student	Datum/date: 24.06.2015
Teile-Nr:/part number	**A2370DD**	Zeichn.-Nr:/drawing no.:	12703-01260

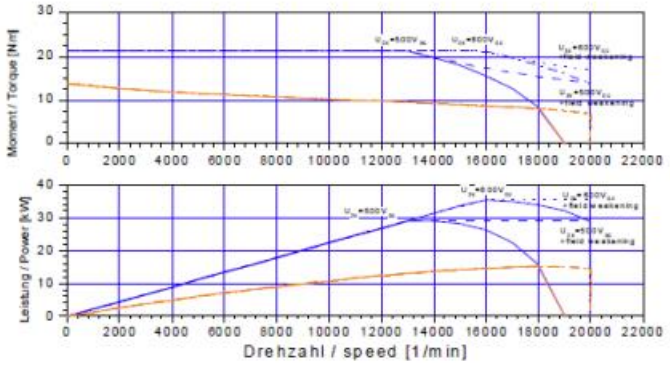
Motorbeschreibung *motor description:*

Motorprinzip/motor principle:	synchron
Kühlart/cooling type:	Flüssigkeit
Bauform/mounting type:	IMB5
Schutzart/degree of protection:	IP 65
Isolierklasse/insulation class:	F

Leistungsdaten *performance data:*

Betriebsart/duty type:	S1 dT=80K	
Dauerstillstandsmoment/continuous Stall Torque "Mo":	13,8	Nm
Maximales Moment/maximum torque "Mmax":	21	Nm
Bemessungsmoment/rated torque "Mn" (ID32771):	9,8	Nm
Bemessungsleistung/rated power "Pn":	12,3	kW
Bemessungsdrehzahl/rated speed "Nn" (ID32772):	12000	rpm
Theo. Leerlaufdrehzahl/theor. no-load-speed "No":	18617	rpm

Motorkennlinien *performance - characteristics:*



Kennlinie kann die maximal zulässige Drehzahl übersteigen! / Characteristic may exceed mechanical speed limit of motor

Elektrische Daten *electrical data:*

Nennspannung/rated voltage "Un" (ID32768):	350	V
Nennstrom/rated current "In" (ID111):	41	Arms
Dauerstillstandsstrom/cont. stall current " Io" (ID34096):	53,1	Arms
Maximalstrom/maximum current "Imax" (ID109):	100	Arms
Maximale Dauer für/duration for "Imax" (ID34168):	1,24	s
Drehmomentkonstante/torque constant " kt":	0,26	Nm/Arms
Spannungskonstante/voltage constant "ke" (ID 34234):	18,8	V/kU/min
Schaltung/connection type:	D	
Polzahl/number of poles "2p" (ID32775):	10	Pole
Klemmenwiderstand/terminal resistance "Rtt" (ID34164):	0,13	Ohm
Klemmeninduktivität/terminal inductance "Ltt" (ID34167):	0,3	mH
Querachseninduktivität/quadrature axis inductance "Lq" (ID34046)	0,54	mH
Hauptachseninduktivität/direct axis inductance "Ld" (ID34045):	0,44	mH
Magn.-Strom/magn. current "Im" (ID32769):	70	Arms
Magn.-Strom/magn. current "Im1" (ID32770):	3,5	Arms
Rotorzeitkonstante/rotor time constant "Tr" (ID32774):	0,01	s

Reglereinstellungen *controller settings:*

Stromregler *current controller:*		
Verstärkung q-Achse/gain q-axis "Kpq" (ID34151):	1,62	V/A
Verstärkung d-Achse/gain d-axis "Kpd" (ID34152):	1,72	V/A
Nachstellzeitkonstante/time constant "Tnq" (ID34050):	1,2	ms
Nachstellzeitkonstante/time constant "Tnd" (ID34052):	1,2	ms
Adaption Verstärkung/adaption gain "Kpq2" (ID 34179)	20	%
Adaption Nachstellzeit/adaption time constant "Tnq2" (ID 34180)	400	%
Untere Anpaßschwelle/lower adaption limit "Iua" (ID34177):	32	%
Obere Anpaßschwelle/upper adaption limit "Ioa" (ID34178):	78	%
Drehzahlregler *speed controller (default for plain motor):*		
Verstärkung/gain "Kp_n" (ID100):	40	
Nachstellzeitkonstante/time constant "Tn_n" (ID101):	10	ms
Spannungsregler *voltage controller:*		
Spannungsregler/voltage controller "Kp" (ID34148):	0,08	A/V
Spannungsregler/voltage controller "Tn" (ID34149):	6	ms
Spannungsüberhöhung "dU" (ID34235):	116	%
Systemwiderstand "Rs" (ID34233):	0	Ohm

Für dieses Dokument und die darin enthaltenen Angaben behalten wir uns alle Rechte und technische Änderungen vor
All rights reserved for this document and all information included. Technical modifications reserved (c) AMK Antriebs- und Steuerungstechnik GmbH Co. KG

Appendice C

DATASHEET Motori DD5-14-10-POW

Motor-Datenblatt *motor data sheet*

AMK

Bezeichnung/name **DD5-14-10-POW** - 18600-B5 - Formula Student Datum/date: 24.06.2015

Teile-Nr:part numbe **A2370DD** Zeichn.-Nr:/drawing no.: 12703-01260

Mechanische Daten ***mechanical data:***

Gesamtmasse/motor mass "m":	3,55	kg
Motorträgheitsmoment/inertia "J":	2,74	kgcm²
Mech. zul. Drehzahl/mech. speed limit "Nmax":	20000	rpm
Rundlauf/run out (DIN 42955):	N	
Wuchtgüte/balancing quality:	G2,5	
Schwingstärke/vibration level (DIN ISO 2373):	N	
Passfeder/shaft key:	-	

Bremsendaten ***brake data:***

Typ/type:	-	
Bremsmoment/brake torque:		Nm
Bremsenstrom/brake current:		A
Bremsenspannung/brake voltage:		V
Spannungsart/voltage type	-	
Einfallzeit/engage time "Te":	0	ms
max. Bremsenergie/max. braking energy:		
einmalig/single engagement:		J
Lebenslang/lifetime:		J

Lüfterdaten ***fan data:***

AMK-TNr./AMK part number:	-	
Lüfterspannung/fan voltage:		V
Strom/current:		A
Frequenz/frequency:		Hz

Wicklungsschutz ***thermistor:***

Typ/type (ID34166):	KTY84	
Ansprechtemp./operation temp:	-	°C
Widerstand/resistance (25°C) < =:	629	Ω

Lagerbelastung ***bearing load:***

(Lastangriff Mitte Abtriebswelle): / (Force to the middle of the shaft): F_r

A/B - Lager/A/B - side bearing:	
Lagertyp/bearing type :	6005 / 6003
Fettsorte/type of grease:	GE2 / GE2
theo. Fettgebrauchsdauer/grease life time:	13000 / 18000 h
bei Nenndrehzahl und 70°C Lageraußenringtemp/at rated speed and 158°F at outer bearing ring	
erforderliche Fettmenge/necessary grease quantity :	0 / g
Maximale Axialkraft bei Montage/max. axial force for assembly:	3275 N
A - Lager/A - side bearing:	

Geberdaten ***position encoder data:***

AMK-TNr/AMK part number:	108072	
Typ/type:	P	
Impulszahl/number of pulses:	262144	

Bemerkungen ***remarks:***

automatisch erstellt, Geber 18 Bit

Daten nur gültig mit enstprechender Wasserkühlung

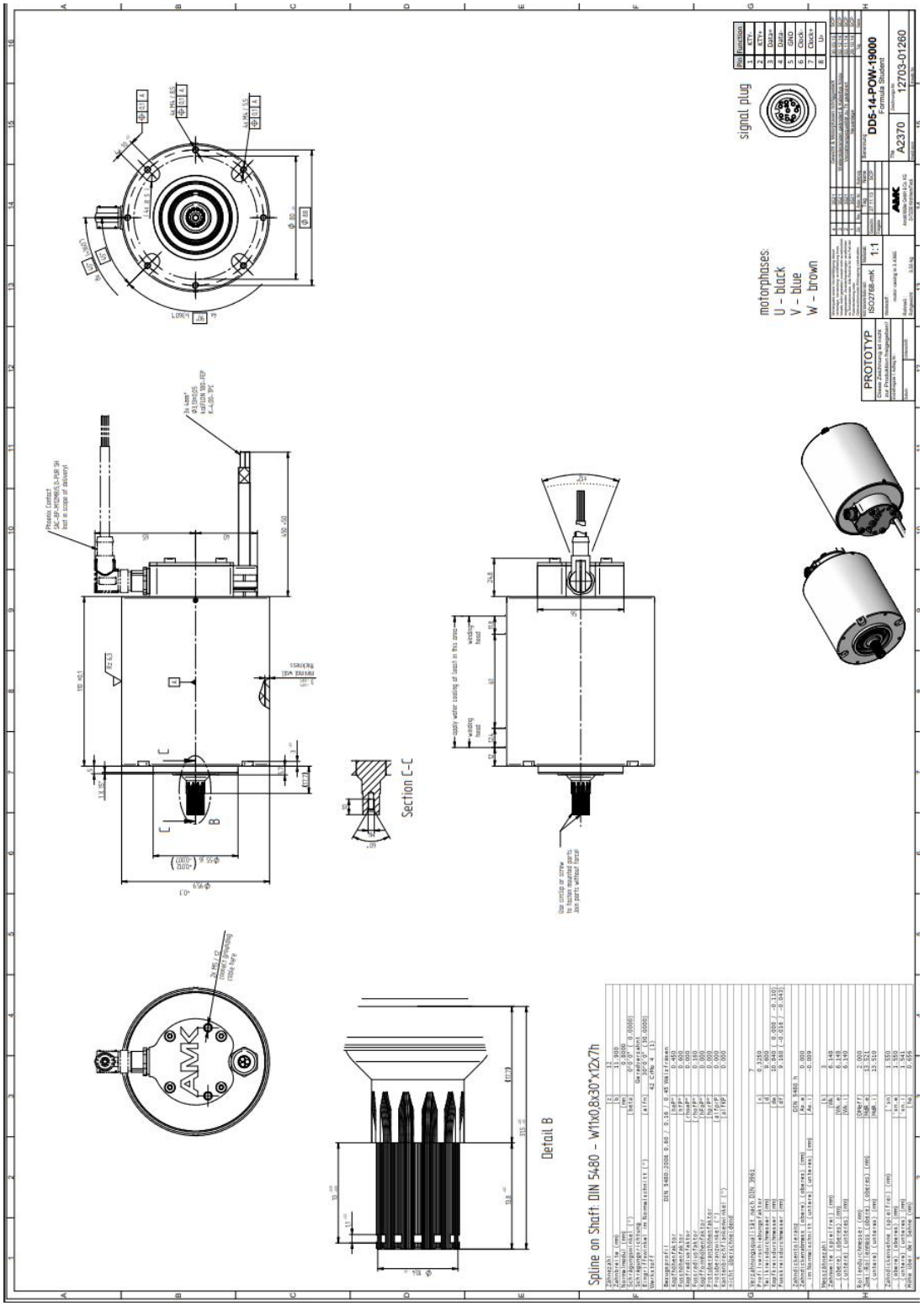
* *Typenschildbezeichnung unterstrichen; bitte bei Rückfragen immer angeben /Nameplatedata underlined; please state with every inquiry*

Ersteller/created by: SMM **Änderungsstand Mechanik/revision motor-mechanics:** 0.00 **Änderungsdatum/motor revision motor date** 30.03.2015

Für dieses Dokument und die darin enthaltenen Angaben behalten wir uns alle Rechte und technische Änderungen vor
All rights reserved for this document and all information included. Technical modifications reserved (c) AMK Antriebs- und Steuerungstechnik GmbH Co. KG

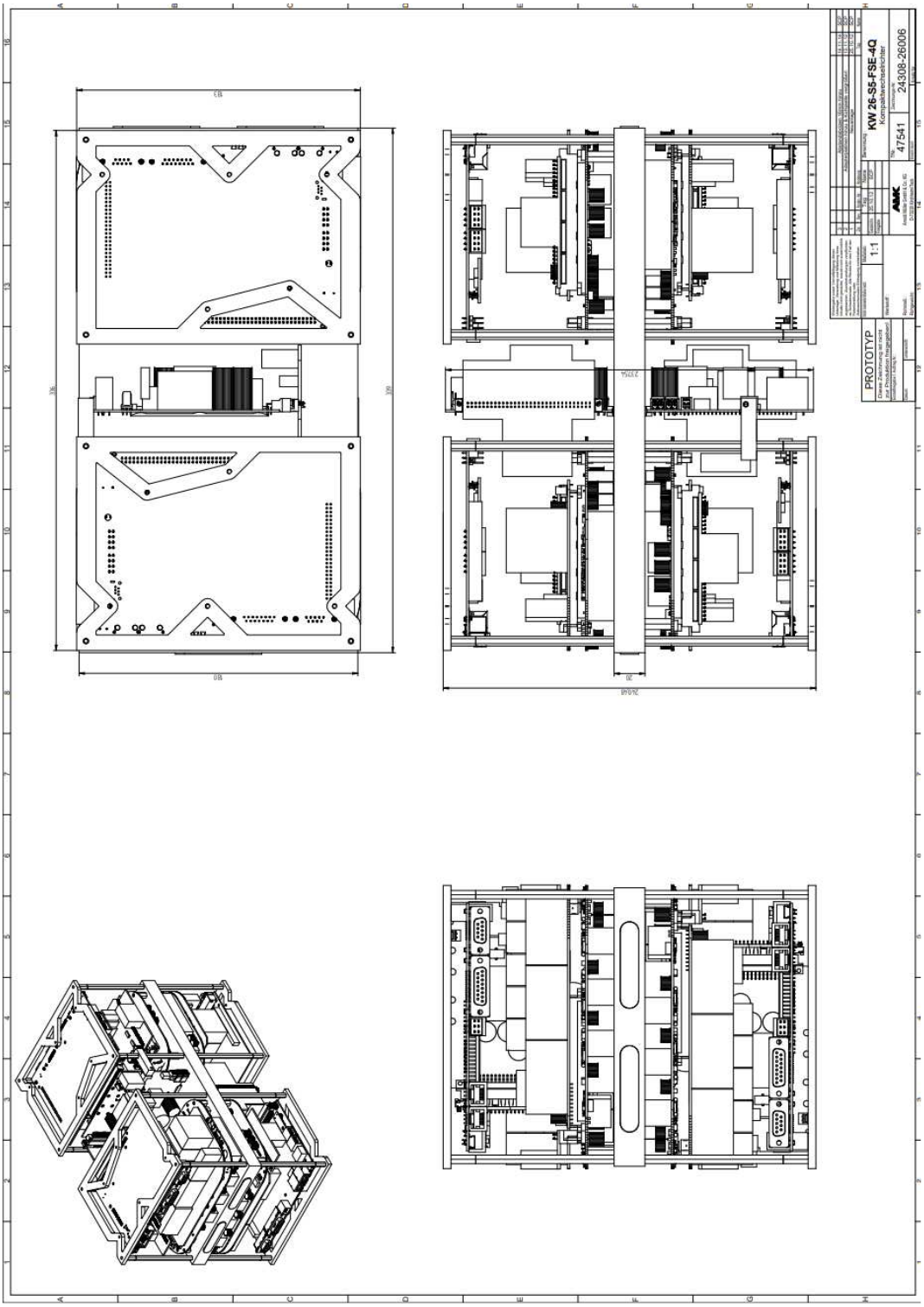
Appendice D

Tavola motore



Appendice E

Tavola inverter



Bibliografia

1) SAE International, “History of Formula SAE,”
2) Institution of Mechanical Engineers, “About Formula Student,” http://www.imeche.org/events/formula-student/about-formula-student
3) Polimarche racing team, https://www.polimarcheracingteam.com/it/vetture
4) batteryuniversity.com. Learn About Batteries – Contents https://batteryuniversity.com/learn/
5) Battery University: https://batteryuniversity.com/learn/archive/is_lithium_ion_the_ideal_battery
6) Battery University: https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells
7) Miao Y., Hynan P., Von Jouanne A., Yokochi A. “Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements”
8) Battery University: https://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries
9) bcg.com. Batteries for Electric Cars - Boston Consulting Group https://www.bcg.com/documents/file36615.pdf
10) st.com. Automotive Battery Management System (BMS)
11) E. Raszmann, K. Baker, Y. Shi and D. Christensen, ”Modeling stationary lithium-ion batteries for optimization and predictive control,”
12) SAE International, “2022 Formula SAE Rules,”
13) Formula Student Electric Rules 2022, Formula Student, Germany
14) Adams, W 1884, Electric Motor, US Patent 300827
15) Batzel, T & Lee, K 2005, ‘Electric Propulsion with the Sensorless Permanent Magnet Synchronous Motor’

16) Cakir, K 2004, In-Wheel Motor Design for Electric Vehicles. Masters Thesis, Sabanci University, Istanbul.

17) Chan, C & Wong, Y 2004, 'The state of the art of electric vehicle technology', 4th International Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC2004

18) Cheng, Y, Duan, F & Cui, S 2005, 'The Design Principle of Electric Motors and Drive Systems for Electric Vehicles', Proceedings of the 8th International Conference on Electrical Machines and Systems

19) Hui, T, Basu, K & Subbiah, V 2003, 'Permanent magnet brushless motor control techniques', Proceedings of Power Engineering Conference, PECon 2003

20) T. Finken, M. Hombitzer, and K. Hameyer. "Study and comparison of several permanent-magnet excited rotor types regarding their applicability in electric vehicles" Hughes. Electric Motors and Drives : Fundamentals, Types and Applications

21) F. Hermansson et al. "Hybridization of Formula Student Car". Bachelor Theisis in Applied MEchanics. 2012

22) B. Jacobson. Vehicle Dynamics. Chalmers University Of Technology. 2012

23) Design of electrical powertrain for Chalmers Formula Stu□dent with focus on 4WD versus RWD and regenerative braking, Bachelor's thesis in Applied Mechanics CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

24) amk-group.com. FSE RACING KIT

25) Formula Student Team Delft, "DUT16 Design Presentation Live Stream,"

26) AMK Arnold Müller GmbH & Co. KG, "AMK RACING KIT 4 wheel drive "Formula Student Electric"

27) Enstroj, "Technical Data Table for EMRAX 228"