



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA MECCANICA

SVILUPPO DI UNA PIATTAFORMA DI TESTING PER MOTORI ELETTRICI PER IL PROGETTO DI UNA VETTURA AD IDROGENO ALIMENTATA DA FUEL CELL

Tesi di laurea magistrale in Controllo MCI LM

Relatore

Prof. Enrico Corti

Presentata da

Edoardo Badiali

Correlatore

Prof. Giacomo Silvagni

Sessione Marzo 2025

Anno Accademico 2023/2024

INDICE

| | |
|--|-----------|
| INTRODUZIONE | 5 |
| CAPITOLO 1: PRESENTAZIONE DEL PROBLEMA DA AFFRONTARE | 6 |
| 1.1 Panorama energetico | 6 |
| CAPITOLO 2: PRESENTAZIONE DEL PROGETTO | 10 |
| 2.1 Progetto “Emilia 4H” | 10 |
| 2.2 Descrizione del veicolo e componenti..... | 11 |
| CAPITOLO 3: MOTORI ELETTRICI | 13 |
| 3.1 Generalità sui motori elettrici | 13 |
| 3.2 Motori a Corrente Continua (DC) | 13 |
| 3.2.1 Struttura | 13 |
| 3.2.2 Principio di funzionamento di un motore DC a spazzole. | 14 |
| 3.2.3 Vantaggi e svantaggi..... | 16 |
| 3.3 Motori asincroni o a Induzione..... | 17 |
| 3.3.1 Struttura | 17 |
| 3.3.2 Principio di funzionamento del motore asincrono in c.a. | 17 |
| 3.3.3 Funzionamento da generatore | 19 |
| 3.3.4 Vantaggi, svantaggi e applicazioni dei motori asincroni in c.a. | 19 |
| 3.4 Motore Sincrono a Magneti Permanenti (PMSM) | 20 |
| 3.4.1 Struttura del motore sincrono a magneti permanenti..... | 20 |
| 3.4.2 Principio di funzionamento del motore sincrono a magneti permanenti..... | 20 |
| 3.4.3 Funzionamento da generatore | 21 |
| 3.4.4 Vantaggi, svantaggi e campo di applicazione del motore sincrono a magneti permanenti | 21 |
| 3.4.5 Conclusione sul confronto | 22 |
| CAPITOLO 4: MOTORI SINCRONI BRUSCHLESS | 23 |
| 4.1 Generalità | 23 |
| 4.2 Struttura e funzionamento motore sincrono brushless..... | 24 |
| 4.3 Caratteristica meccanica | 27 |
| CAPITOLO 5: COMUNICAZIONE CAN | 30 |
| 5.1 Introduzione alla Comunicazione CAN (Controller Area Network) | 30 |
| 5.2 Funzionamento del CAN Bus | 30 |
| 5.3 Frame di Comunicazione CAN | 31 |
| 5.4 Funzionamento del Bus CAN: Gestione dei Messaggi e Priorità | 31 |
| 5.5 Vantaggi e Affidabilità del CAN Bus..... | 32 |
| 5.6 CAN Bus nel Controllo di Motori Elettrici | 32 |

| | |
|---|-----------|
| 5.7 Implementazione della Comunicazione CAN in MATLAB..... | 32 |
| CAPITOLO 6: CABLAGGIO DEL MOTORE E SETUP DEL TEST | 35 |
| 6.1 Scheda tecnica del motore | 35 |
| 6.2 Cablaggio del motore | 35 |
| 6.3 Circuito di precarica..... | 41 |
| 6.3.1 Struttura circuito di precarica..... | 42 |
| 6.3.2 Scelta del contattore | 43 |
| 6.3.3 Il circuito RC..... | 44 |
| 6.3.4 Scelta di un resistore | 45 |
| 6.4 Setup utilizzato per i test..... | 46 |
| 6.5 Supporto per il test del motore | 48 |
| CAPITOLO 7: COMUNICAZIONE CAN CON IL MOTORE..... | 51 |
| 7.1 Struttura messaggio di controllo | 51 |
| 7.2 Struttura dei messaggi di stato del motore..... | 51 |
| 7.3 Messaggi di errore | 52 |
| CAPITOLO 8: TESTING DEL MOTORE UTILIZZANDO “FLASH TOOL” | 55 |
| 8.1 Interfaccia Flash Tool..... | 55 |
| CAPITOLO 9: CODICE MATLAB PER IL CONTROLLO DEL MOTORE..... | 57 |
| 9.1 Creare il canale di comunicazione CAN per controllare il motore. | 57 |
| 9.2 Creare il messaggio di controllo e avviare il canale..... | 57 |
| 9.3 Avviare il motore | 58 |
| 9.4 Definizione del profilo di velocità e trasmissione..... | 58 |
| 9.5 Spegner il motore e la comunicazione can e ricezione dei messaggi..... | 59 |
| 9.6 Rappresentazione dei dati acquisiti in grafici..... | 59 |
| 9.7 Soluzioni di possibili errori..... | 59 |
| 9.8 Interazione utente | 60 |
| CAPITOLO 10: SVILUPPO PIATTAFORMA DI TESTING DEL MOTORE | 62 |
| 10.1 Manuale per l’utilizzo del “Testing Motor Tool” | 62 |
| 10.1.1 Schermata principale dell’applicazione:..... | 64 |
| 10.1.2 Avviare il canale CAN | 64 |
| 10.1.3 Scegliere un profilo di velocità prestabilito da far compiere al motore..... | 65 |
| 10.1.4 Settaggio del test..... | 66 |
| 10.1.5 Importare un profilo personalizzato proveniente da un file Excel..... | 67 |
| 10.1.6 Creare un profilo personalizzato direttamente nel tool. | 68 |
| 10.1.7 Schermata durante il test | 70 |
| 10.1.8 Visualizzare la totalità dei risultati | 71 |

| | |
|--|-----------|
| 10.1.9 Esecuzioni successive | 72 |
| 10.1.10 Interruzione manuale del test | 72 |
| 10.1.11 Risoluzione di possibili problemi | 73 |
| CAPITOLO 11: TEST CONSEGUITI CON “TESTING MOTOR TOOL” | 74 |
| 11.1 Profili implementati nel Testing Motor Tool | 74 |
| 11.1.1 Test con profilo a gradini | 74 |
| 11.1.2 Test con profilo a rampa..... | 76 |
| 11.1.3 Test con profilo costante di velocità | 77 |
| 11.2 Ciclo guida NEDC..... | 78 |
| 11.3 Ciclo guida WLTP | 80 |
| CAPITOLO 12: CONCLUSIONI..... | 83 |
| BIBLIOGRAFIA | 85 |

INTRODUZIONE

Nel corso degli ultimi anni si sta assistendo ad un graduale passaggio dall'auto tradizionale (a gasolio, gas o benzina) all'alimentazione elettrica. Questo principalmente perché le auto elettriche offrono una mobilità pulita a emissioni zero. Inoltre i veicoli elettrici a batteria vengono indicati come una soluzione, oltre che per ridurre le emissioni di gas a effetto serra, per diminuire la dipendenza dai combustibili fossili, dato che fanno affidamento su un vettore energetico, l'elettricità, che può aiutare a disaccoppiare il trasporto dal consumo di petrolio. Questi sono in genere indicati come veicoli a zero emissioni perché eliminano l'inquinamento dei fumi di scarico. Tuttavia, nell'ottica di un processo di decarbonizzazione del settore dei trasporti, è necessaria un'analisi dell'intero ciclo di vita per comprendere l'effettiva mitigazione raggiunta, poiché le emissioni non vengono annullate, ma piuttosto spostate verso fasi precedenti nel ciclo di produzione dell'energia (centrali elettriche) e potenzialmente aumentati nella catena di fornitura di produzione dei veicoli, si pensi ad esempio il problema della creazione e smaltimento delle batterie.

In questo contesto l'attività svolta e descritta nella seguente tesi contribuisce al progetto universitario "Emilia 4H" che verte lo sguardo ad una alternativa tecnologica emergente nel mondo dell'automotive per ovviare ai problemi che anche una trazione puramente elettrica continua ad avere. Ovvero mira all'utilizzo di una cella a combustibile (fuel cell) per far sì che la fonte energetica principale del veicolo elettrico preso in esame risulti essere l'idrogeno. Questo permette alla vettura di essere considerata totalmente green visto che come unica fonte di scarico dal processo della fuel cell si otterrà acqua, e permette inoltre anche di risolvere i problemi legati alla trazione elettrica accennati in precedenza. Infatti, se si utilizza la tipologia di idrogeno verde, ovvero prodotta per elettrolisi utilizzando energia prodotta da fonti rinnovabili, si può considerare la vettura nel suo intero ciclo vita completamente a impatto ambientale nullo.

L'attività di tesi fornisce il suo contributo nel progetto "Emilia 4H" nella parte di studio dei motori elettrici, nello specifico si pone come obiettivo l'attività di testing per conseguire alla loro caratterizzazione. Per fare ciò è stato necessario sviluppare una piattaforma che permettesse la comunicazione con i dispositivi presi in esame in modo da far compiere al motore vari profili di velocità al fine di studiarne il comportamento per definirne in seguito la richiesta energetica durante il funzionamento. Questo ultimo fattore è di fondamentale importanza al fine di sviluppare una gestione ottimale dell'energia del veicolo proveniente principalmente da due fonti: fuel cell e pannelli solari.

CAPITOLO 1: PRESENTAZIONE DEL PROBLEMA DA AFFRONTARE

1.1 Panorama energetico

Il settore automotive sta attraversando una profonda trasformazione, spinto dalle esigenze di sostenibilità ambientale, dalla riduzione delle emissioni di gas serra e dalla crescente domanda di soluzioni di mobilità più efficienti. Infatti, secondo i dati dell'Agencia Europea dell'Ambiente il settore dei trasporti è responsabile di circa un quarto delle emissioni totali di CO₂ in Europa, il 71,7% delle quali viene prodotto dal trasporto stradale.

Per questo motivo, nel tentativo di limitare le emissioni di CO₂, l'UE ha fissato l'obiettivo di raggiungere entro il 2030 le emissioni dei trasporti del 60% rispetto ai livelli presenti nel 1990, ed in aggiunta entro il 2050 arrivare alla riduzione del 90%, rispetto sempre al 1990, in modo da raggiungere la neutralità climatica e ridurre efficacemente la emissione dei gas serra dannosi per l'ambiente.

Questo obiettivo ambizioso e necessario non sarà facile da raggiungere, considerando che il tasso di riduzione delle emissioni ha di recente subito un rallentamento. Infatti dopo un periodo di declino costante dei tassi di emissioni di CO₂, nel 2017 si è infatti registrata una controtendenza: le nuove auto hanno emesso una media di 0,4 grammi di CO₂ in più rispetto a quelle immatricolate nell'anno precedente. Per frenare questa tendenza, l'UE ha introdotto nuovi target sulle emissioni di CO₂, con lo scopo di ridurre le emissioni nocive.

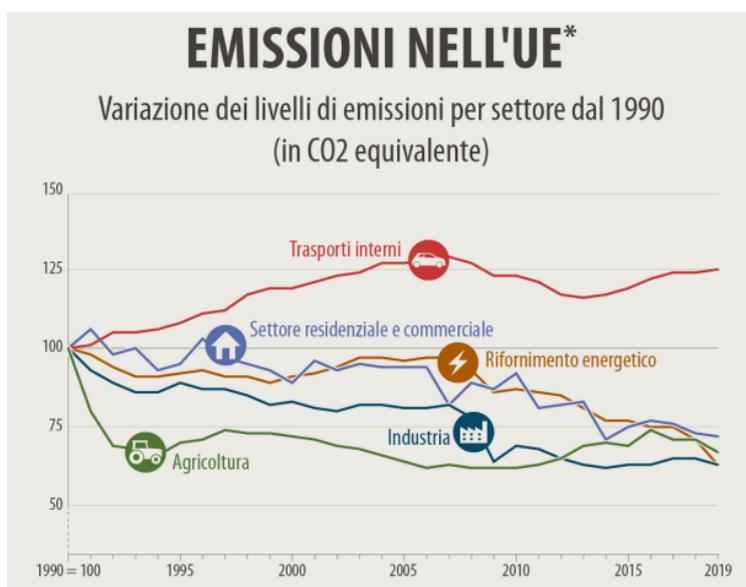


Figura 1. Mutazione dei tassi di emissione di CO₂ nei diversi settori dal 1990 fino al 2019 [1].

Secondo i dati europei negli ultimi tre decenni l'unico settore a vedere un aumento delle emissioni di gas serra è stato quello dei trasporti con un aumento del 33,5% tra il 1990 e il 2019. Inoltre le attuali proiezioni collocano la diminuzione delle emissioni nei trasporti al 22% entro il 2050, una percentuale decisamente inferiore alle ambizioni correnti.

Le emissioni di CO₂ nel settore del trasporto passeggeri differiscono in base alla modalità di trasporto (stradale, ferroviario, aereo e marittimo). Per quanto riguarda il trasporto su strada in

Europa, come si può notare in figura 2, le autovetture sono fra i mezzi più inquinanti considerato che generano il 60,7% del totale delle emissioni di CO2. D'altra parte, le auto potrebbero rientrare fra le modalità di trasporto più green se, anziché viaggiare da soli, ci fossero più passeggeri per singolo veicolo. La media, però, di 1,7 passeggeri per auto in Europa permette ad altre modalità di trasporto, come gli autobus, di conquistare il titolo di alternative più green.

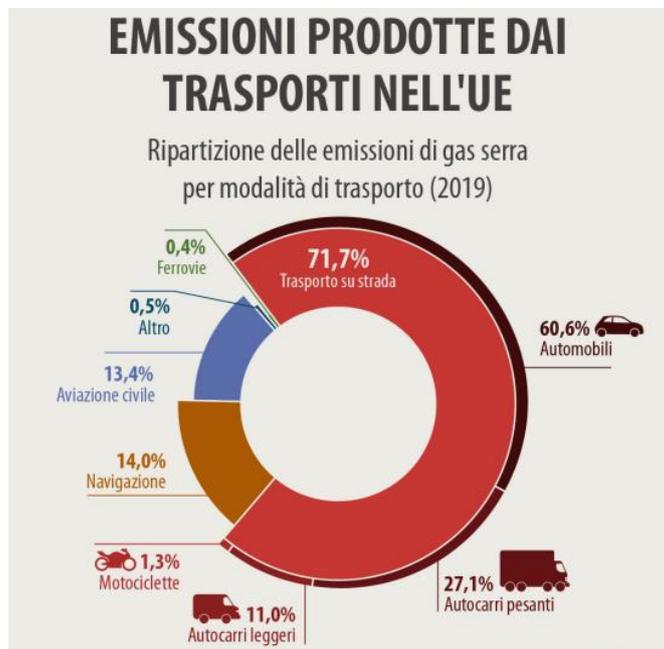


Figura 2. Tassi di emissione di CO2 per modalità di trasporto [1].

In questo contesto la soluzione per ridurre le emissioni nel settore dei trasporti può essere considerata duplice: rendendo i veicoli più efficienti oppure cambiando il tipo di tecnologia che sta alla base dell'alimentazione delle autovetture.

Secondo i dati europei nel 2019 la maggior parte del trasporto stradale in Europa è stato alimentato a diesel (66,7%) seguito dalla benzina (24,55%); mentre le auto elettriche stanno guadagnando grande popolarità, nel 2021 queste hanno rappresentato l'17,8% delle autovetture immatricolate, in notevole ascesa rispetto al 10,7% del 2020.

Ma se ci si chiede quali siano i tassi delle emissioni di CO2 prodotte da un'auto bisogna tenere in considerazione non solo il CO2 prodotto durante l'uso del veicolo, ma anche le emissioni causate dalla produzione e dallo smaltimento del veicolo stesso, quindi bisogna considerare tutto il ciclo vita del veicolo. In particolare, la produzione e lo smaltimento di un'auto elettrica sono meno green di quelli delle auto con motore a combustione interna, si pensi soltanto al problema dello smaltimento e creazione di batterie. Infatti la produzione di batterie dipende fortemente dalle importazioni di materie prime critiche, in particolar modo quelle di cobalto, litio, nichel e manganese, dei metalli ad impatto ambientale e sociale molto elevato.

I livelli delle emissioni di CO2 prodotti dalle auto elettriche variano, inoltre, in base al modo in cui l'elettricità viene prodotta. Questo dipende molto dal mix energetico di ogni nazione, ma è chiaro che per riuscire a rendere sostenibile e vantaggioso il fenomeno dell'elettrificazione dei veicoli è necessaria una crescita di produzione di energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili, o comunque

in maniera sostenibile rispetto ai metodi tradizionali; ed inoltre sono necessari sviluppi tecnologici per la fabbricazione di batterie più sostenibili.

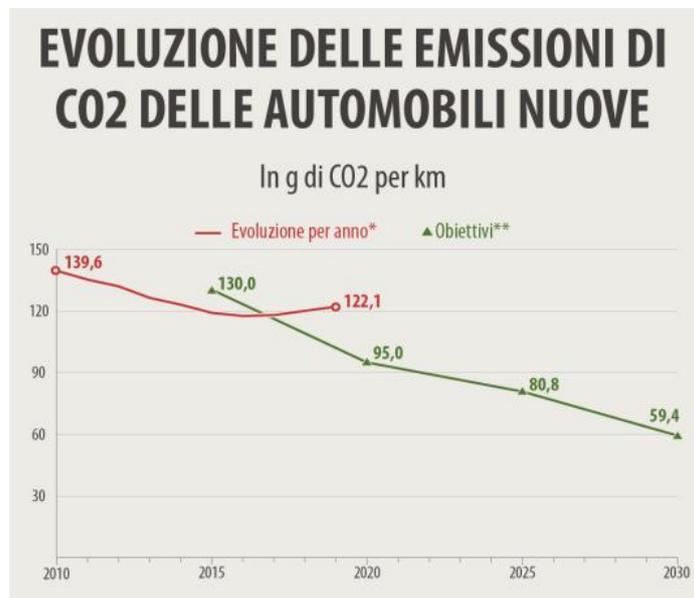


Figura 3. Evoluzione delle emissioni di CO2 g/Km nel settore dei trasporti [1].

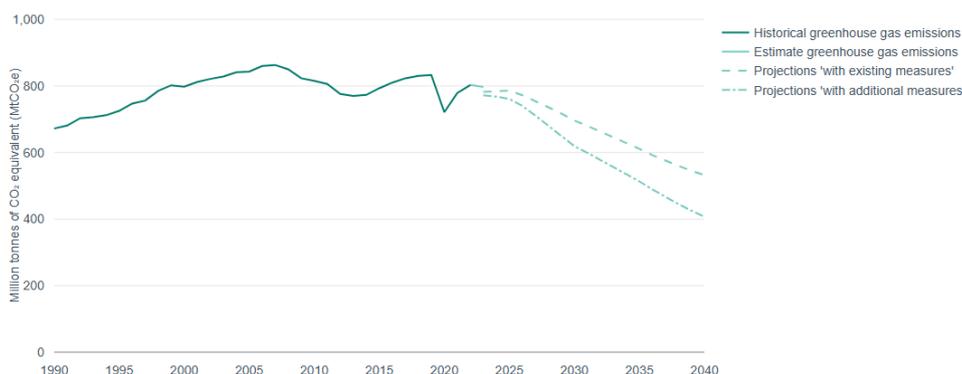


Figura 4. Andamento delle emissioni di gas serra nel settore dei trasporti effettive e obiettivi futuri [14].

Come si nota dalle figure 3 e 4 le emissioni di gas serra sono ancora molto elevate rispetto agli obiettivi prefissati. Riguardo a questo problema l'Unione Europea si trova dinanzi a una sfida cruciale, la sua produzione e il consumo energetico continuano a contribuire in modo significativo alle emissioni di gas serra e inoltre l'UE è ancora dipendente dalle importazioni di energia, principalmente petrolio e gas. A tal proposito si considera una tecnologia promettente per contribuire in modo sostenibile al raggiungimento della neutralità climatica nell'ambito della produzione di energia l'uso di idrogeno verde, ovvero prodotto dall'elettrolisi dell'acqua che, utilizzando energia elettrica da fonti rinnovabili, non emette gas serra durante le fasi di produzione.

In particolare, l'idrogeno rappresenta il 2% del del mix energetico UE, sebbene per il 95% della sua produzione si ricorra ancora a combustibili fossili, con la conseguenza di un rilascio di 70-100 milioni di tonnellate di CO2 all'anno. Secondo la ricerca, le energie rinnovabili potrebbero provvedere un contributo sostanzialmente sulla filiera energetica dell'UE nel 2050. Nella fattispecie, l'idrogeno potrebbe rappresentare fino al 20% dell'energia e, nello specifico, provvedere tra il 20 e il 50% del

fabbisogno per i trasporti e tra i 5 e il 20% del fabbisogno per l'industria. Un'economia basata sull'idrogeno rinnovabile potrebbe ridurre in maniera significativa l'impatto del cambiamento climatico rispetto a un'economia basata sui carburanti fossili. Infatti, date le sue caratteristiche, l'idrogeno può costituire un ottimo combustibile poiché:

- Il suo utilizzo come fonte energetica non emette gas serra (l'acqua è l'unico derivato del processo)
- Può essere usato per produrre altri gas, come i combustibili liquidi
- Le infrastrutture esistenti (stoccaggio e trasporto dei gas) possono essere riconvertite ad idrogeno
- La sua densità energetica è maggiore di quella delle batterie, e quindi può essere utilizzato per trasporti a lunga distanza e merci pesanti.

Dunque, per ridurre le emissioni del trasporto su strada, l'UE intende integrare gli obiettivi di CO2 proposti con:

- Un nuovo sistema di scambio di emissioni (ETS) per il trasporto su strada e per gli edifici
- Aumento della quota di carburanti rinnovabili per autotrazione
- La rimozione dei vantaggi fiscali per i combustibili fossili
- Una revisione della normativa sulle infrastrutture dei combustibili alternativi per ampliare la capacità

In conclusione, all'interno del contesto appena descritto, i motori elettrici si stanno imponendo come una delle tecnologie più promettenti per la decarbonizzazione dei trasporti, favorendo il passaggio dai tradizionali motori a combustione interna riducendo significativamente l'impatto ambientale, ovviamente entro i limiti dei problemi sul loro ciclo vita come descritto precedentemente. Questi però devono essere associati a tecnologie di alimentazione che facciano fronte ai loro limiti e aiutino a rendere l'intero sistema di propulsione sostenibile. Alcune di queste tecnologie innovative sono le fuel cell, quindi utilizzando l'idrogeno, oppure l'utilizzo di combustibili sintetici. Le celle a combustibile, infatti, utilizzano l'idrogeno per produrre energia elettrica, con il vantaggio di generare solo vapore acqueo come emissione, mentre i combustibili sintetici, prodotti a partire da CO2 e idrogeno verde, potrebbero consentire una transizione semplice verso veicoli a emissioni zero, compatibili con la rete di infrastrutture esistenti e senza apportare molte modifiche alla struttura dei veicoli odierni.

CAPITOLO 2: PRESENTAZIONE DEL PROGETTO

Come annunciato in precedenza l'attività di tesi si cimenta nel progetto universitario "Emilia 4H" che verrà descritto nel seguente capitolo.

2.1 Progetto "Emilia 4H"

Il progetto "Emilia 4H" prende in esame un prototipo di veicolo solare da competizione progettato e costruito dall'Università di Bologna in collaborazione con l'Associazione Onda Solare. Questo veicolo, denominato 'Emilia IV', si è dimostrato una sports car dalle prestazioni eccezionali, vincendo due delle tre più importanti competizioni di settore (American Solar Challenge del 2018 ed European Solar Challenge del 2021). Il passo aggiuntivo che si è voluto conseguire nella attività di tesi che verrà descritta in seguito è la trasformazione del prototipo in un veicolo dotato di tecnologia a fuel cell per far fronte ai problemi nell'ambito dei trasporti descritti nel capitolo precedente. Sebbene questa tecnologia sia ancora in fase di sviluppo, i suoi vantaggi in termini di autonomia, velocità di rifornimento e capacità di integrazione con le fonti di energia rinnovabili sono indiscutibili. Una transizione su larga scala verso l'idrogeno come combustibile per i trasporti potrebbe, infatti, accelerare il processo di decarbonizzazione, riducendo drasticamente l'impatto ambientale del settore e contribuendo a un futuro più sostenibile.

In particolare, il progetto ha come obiettivo la trasformazione della vettura solare da competizione universitaria implementando su di essa una alimentazione aggiuntiva ad idrogeno. La vettura, dunque, sarà dotata di una trazione puramente elettrica alimentata da due principali fonti di energia: solare proveniente dall'impianto fotovoltaico installato sopra l'abitacolo e quella proveniente dalla fuel cell. Queste due fonti di energia gestite nella maniera opportuna contribuiscono al mantenimento di uno "state of charge" ottimale della batteria, e quindi permettono al veicolo di essere più efficiente possibile godendo di una ampia autonomia senza dover mai ricaricare la batteria, al contrario dei veicoli elettrici tradizionali, e inoltre lo porta ad essere considerato totalmente sostenibile.

In conclusione, lo sviluppo di una vettura alimentata ad idrogeno si pone due principali obiettivi: essendo pensata come un veicolo da competizione ovviamente sarà fondamentale renderlo più efficiente possibile e sviluppare una gestione energetica del veicolo efficace per poterlo rendere competitivo nelle gare in cui si cimenterà. Inoltre, è importante considerare anche un altro fattore che risulta essere l'obiettivo di tutte le attività di ricerca come questa, ovvero lo studio di una tecnologia emergente per risolvere i principali problemi odierni nell'ambito dei trasporti che porterà quindi ad una verifica di essa e una spinta a tutto il settore per muoversi verso una soluzione più sostenibile.



Figura 5. Rendering del veicolo Emilia 4H.

2.2 Descrizione del veicolo e componenti

Il veicolo da progettare, testare ed infine portare in pista sarà dotato principalmente da una trazione posteriore puramente elettrica gestita da due motori sincroni a magneti permanenti. Questi sono alimentati dalla batteria che sarà mantenuta ad uno certo “state of charge” grazie all’energia proveniente dall’impianto fotovoltaico, installato sopra l’abitacolo, e a quella proveniente dalla fuel cell.

Nella immagine sottostante è rappresentato il disegno della struttura complessiva del veicolo:

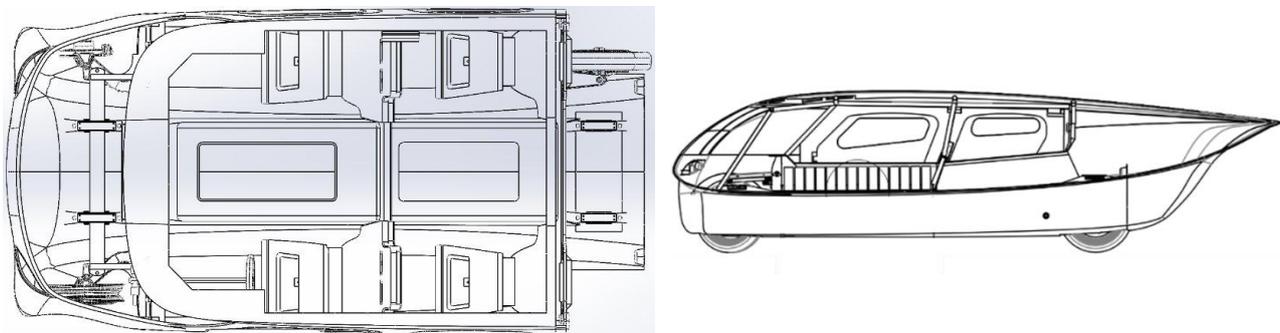


Figura 6. Schemi strutturali di Emilia 4H.

Nello specifico la vettura progettata è dotata dei seguenti principali sistemi e componenti:

- Sistema di Stoccaggio dell'Idrogeno da 13L in fibra di carbonio: L'idrogeno deve essere stoccato in serbatoi ad alta pressione e la progettazione di questo e del vano in cui verrà inserito deve garantire la sicurezza operativa secondo le normative vigenti per l'idrogeno (normativa ATEX). Il serbatoio è situato nella coda del veicolo in modo da tenerla totalmente isolata dal resto del veicolo per soddisfare queste normative.
- Fuel Cell Stack da 2 kW: Il cuore del sistema di alimentazione, che converte l'idrogeno in energia elettrica necessaria per l'alimentazione della trazione elettrica del veicolo, in

particolare per mantenere ad uno certo “state of charge” la batteria. Lo Stack si trova nel retrotreno assieme al serbatoio sempre secondo le necessità imposte dalla normativa Atex.

- Pannelli solari: l’impianto solare trasforma l’energia proveniente dalla luce solare in energia elettrica da indirizzare alla batteria. I pannelli sono disposti sulla parte superiore dell’abitacolo in modo da essere sempre esposti ai raggi solari ed essendo il luogo più ampio ed esposto del veicolo.
- 2 Motori Elettrici da 4,5 kW sincroni a magneti permanenti con controllore integrato: i motori elettrici trasformano l'energia elettrica proveniente dalla batteria, caricata dalle fuel cell e pannelli solari, in energia meccanica per la trazione della vettura. Invece il controllore, dotato di inverter, regola la conversione tra corrente continua (DC) dalla batteria e corrente alternata (AC) per poter controllare il motore e la sua velocità. Il veicolo è dotato di una trazione posteriore e quindi i due motori sono montati alle sospensioni posteriori della vettura.
- Batteria da 48 Volt e Sistema di Gestione Energetica (BMS) integrata: Un sistema avanzato di gestione dell'energia è necessario per ottimizzare il flusso di energia tra fuel cell, pannelli solari, batteria e motori, per garantire che l’energia sia utilizzata in maniera efficiente e che le batterie vengano ricaricate e mantenute allo stato di carica ottimale durante la guida. La batteria, essendo il componente più pesante, è situata nel vano centrale del veicolo in modo da avere una distribuzione del peso il più possibile bilanciata.

Lo schema generale del veicolo dove è possibile visualizzare il posizionamento di tutti i suoi componenti principali è il seguente:

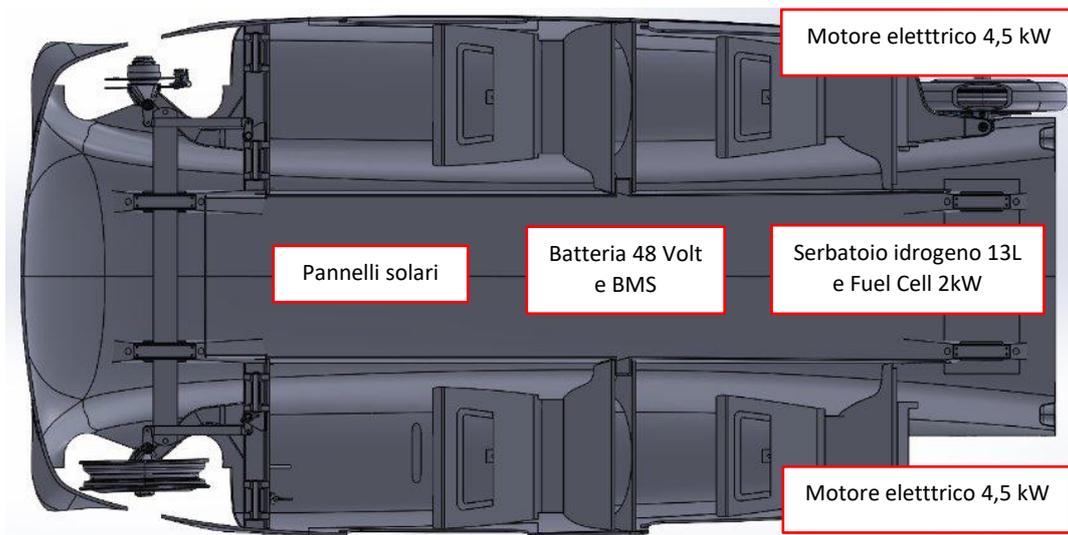


Figura 7. Schema posizionamento componenti principali di Emilia 4H.

CAPITOLO 3: MOTORI ELETTRICI

L'attività descritta in questa tesi, riguardante il progetto "Emilia 4H" presentato nel capitolo precedente, verte il suo contributo allo studio dei motori elettrici ed in particolare alla loro attività di caratterizzazione e testing. Quindi nel seguente capitolo verrà fatta una panoramica generale sulle diverse tipologie di motori elettrici presenti sul mercato tipicamente utilizzati per la trazione elettrica dei veicoli, facendo un confronto tra essi e ponendo maggiore rilevanza ai motori sincroni a magneti permanenti essendo la tipologia utilizzata nel progetto.

3.1 Generalità sui motori elettrici

Un motore elettrico in generale è un dispositivo che converte l'energia elettrica in energia meccanica ed in particolare sfrutta le leggi elettromagnetiche per generare coppia meccanica.

Nel settore automotive e in numerosi altri ambiti industriali, esistono diverse tipologie di motori elettrici, ciascuna con specifiche caratteristiche che le rendono più o meno adatte a determinati utilizzi. Tra i motori più utilizzati per applicazioni ad alte prestazioni, in particolare nel contesto della mobilità elettrica, si trovano i motori sincroni a magneti permanenti (PMSM), i motori asincroni o a induzione (IM) e i motori a corrente continua (DC). In particolare:

- I motori a corrente continua sfruttano una corrente elettrica che scorre attraverso l'avvolgimento del rotore immerso nel campo magnetico statorico. Da questa interazione nasce una forza sul rotore che produce quindi una coppia meccanica che permette la rotazione del rotore. Questa rotazione è ciò che permette al motore di produrre lavoro meccanico a partire dall'energia elettrica fornita.
- I motori a corrente alternata asincroni sono caratterizzati da una corrente alternata all'avvolgimenti di statore che induce un'altra corrente nell'avvolgimento del rotore per la legge di Faraday. Quest'ultima genererà una forza sul rotore secondo la legge di Lorenz che sarà responsabile della creazione di coppia meccanica da parte del motore.
- Nei motori a corrente alternata sincroni il campo magnetico del rotore è dovuto o a dei magneti permanenti o ad una bobina di eccitazione ed ha direzione costante in un sistema di riferimento fissato al rotore. Il rotore a regime si muove con una frequenza sincronizzata con quella del campo magnetico generato dallo statore grazie all'alimentazione trifase di cui i suoi avvolgimenti sono dotati.

Nelle prossime sezioni verrà analizzato il confronto tra il motore sincrono a magneti permanenti e gli altri tipi di motori elettrici, con un focus sui vantaggi che lo rendono particolarmente interessante per il settore automotive visto che è la tipologia scelta per la trazione del veicolo.

3.2 Motori a Corrente Continua (DC)

3.2.1 Struttura

Come si può notare nella figura sottostante, un motore a corrente continua a spazzole è caratterizzato da magneti permanenti fissi sullo statore e da un rotore libero di ruotare costituito

da avvolgimenti di rame e da un commutatore che serve per fornire energia elettrica alla bobina rotoria tramite delle spazzole.

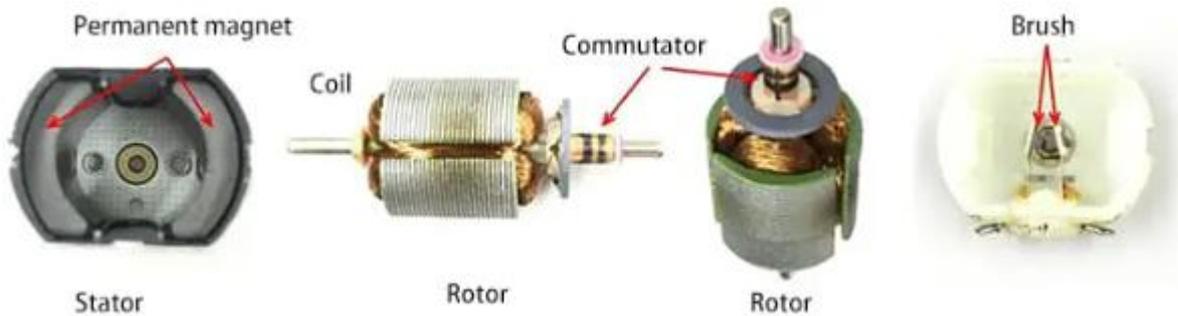


Figura 8. Struttura di un motore a corrente continua [7].

Come si nota in figura 8 alla periferia dell'asse centrale rotante si trovano tre commutatori disposti a intervalli di 120 gradi ($360 \text{ gradi} \div 3$), ovvero piastre metalliche curve solidali all'asse di rotazione per la commutazione della corrente. Ogni commutatore è collegato a un'estremità della bobina e a un'altra estremità della bobina, e i tre commutatori e le tre bobine formano nel complesso una rete di circuiti a forma di anello. Inoltre, due spazzole sono fissate a 0° e a 180° per portare corrente ai commutatori. Infine, l'alimentazione esterna in corrente continua è collegata alle spazzole e la corrente scorre lungo il percorso spazzola, commutatore, bobina, spazzola.

Il commutatore di un motore elettrico a corrente continua (DC) è un componente fondamentale che serve a invertire la direzione della corrente elettrica che scorre nelle spazzole e nell'armatura (la parte rotante del motore) durante ogni giro del motore. Questo processo è necessario per mantenere la rotazione continua e permettere al motore di girare in una sola direzione.

3.2.2 Principio di funzionamento di un motore DC a spazzole.

Il motore a corrente continua si basa sulle leggi elettromagnetiche riguardanti la generazione di una forza agente su di un conduttore percorso da corrente immerso in un campo magnetico, ovvero la forza di Lorentz. La forza così creata è esprimibile attraverso la seguente formula:

$$F = B \times I \times l \text{ [N]}$$

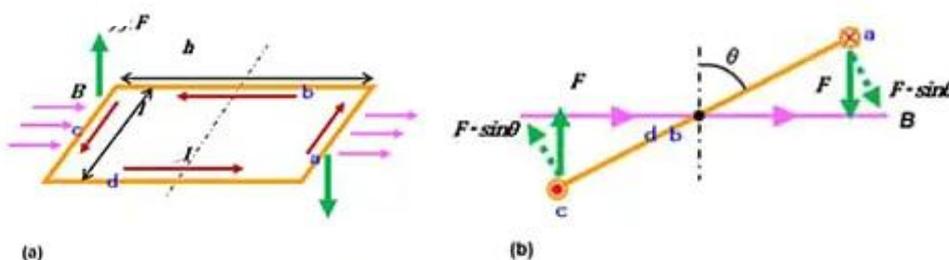


Figura 9. Schema spira percorsa da corrente soggetta a forza di Lorentz [7].

Prendendo in considerazione una spira come in figura 9, il verso di tale forza segue la regola della mano destra e dunque è diretta perpendicolare alla spira producendo quindi una coppia intorno

all'asse centrale. Pertanto, considerando lo stato in cui l'angolo di rotazione della spira è θ , la coppia agente può essere espressa dalla seguente formula:

$$T = B \times I \times h \times l \times \sin\theta \quad [N \cdot m]$$

Poiché l'area del rettangolo è $S = h \times l$, sostituendola alla formula precedente si ottiene la seguente espressione:

$$T = B \times I \times S \times \sin\theta \quad [N \cdot m]$$

Questa formula, quindi, esprime la coppia che porta in rotazione la spira stessa finché il vettore superficie della spira non diventa perpendicolare alla direzione del campo magnetico come si può notare nella figura sottostante.

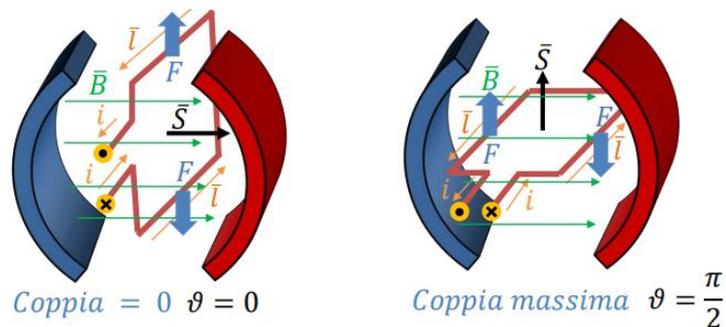


Figura 10. Schema funzionamento motore DC [13].

Come si nota dalla figura la spira è libera di ruotare e si porterà nella condizione in cui il flusso concatenato è massimo ($\vartheta = 0$), questa rappresenta la posizione di equilibrio stabile del sistema. A questo punto entra in gioco il commutatore. Mentre il rotore ruota, le spazzole in materiale conduttivo rimangono in contatto con il commutatore, permettendo la corrente di entrare e uscire dall'avvolgimento del rotore. Questo sistema assicura che la direzione della corrente nell'avvolgimento del rotore venga invertita ogni mezzo giro, assicurando quindi l'inversione del verso della forza che agisce e quindi continuità della coppia e della rotazione del motore.

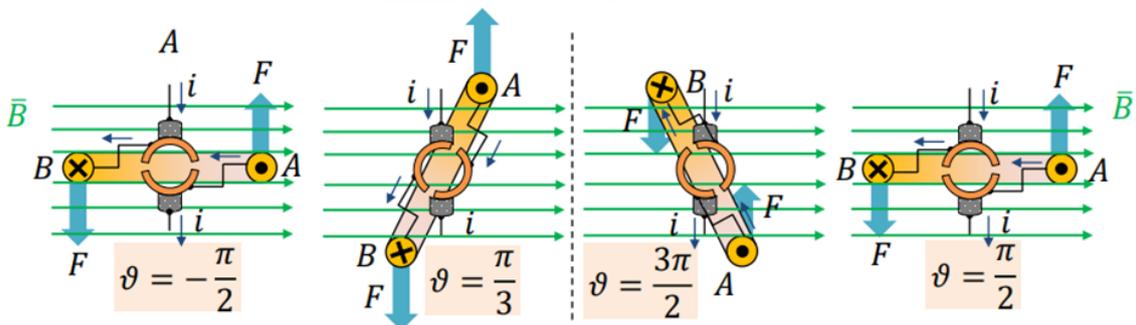


Figura 11. Schema funzionamento commutatore [13].

A questo punto avremmo una coppia pulsata, ma aggiungendo altre spire al rotore si crea una coppia costante.

La macchina a corrente continua, dunque, sfrutta questo principio per generare coppia meccanica con l'unica differenza che al posto della spira è presente l'avvolgimento di rotore come è possibile notare nello schema sottostante. Per ogni singolo conduttore la forza è esprimibile come il prodotto della forza di Lorentz per il braccio e sommando i contributi di tutti i conduttori dell'avvolgimento rotorico si riesce a ricavare la coppia totale.

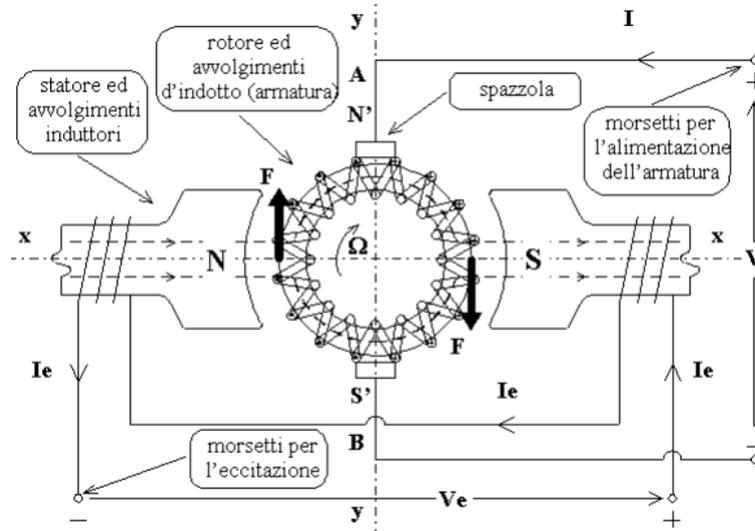


Figura 12. Schema funzionamento di un motore DC [7].

3.2.3 Vantaggi e svantaggi

I motori a corrente continua sono tra i più semplici da controllare, ma sono meno efficienti e più ingombranti rispetto ad altre soluzioni. Il vantaggio di un motore a corrente continua è la capacità di regolare facilmente la velocità cambiando la tensione, fornendo una coppia maggiore e rendendolo adatto a carichi che richiedono frequenti regolazioni della velocità, come i mulini nelle acciaierie e gli ascensori nelle miniere. Tuttavia, con lo sviluppo della tecnologia di conversione di frequenza, i motori a corrente alternata possono ora regolare la velocità modificando la frequenza. Sebbene il costo di un motore a frequenza variabile non sia significativamente superiore a quello di un motore DC, esso rappresenta comunque una parte significativa del costo complessivo dell'apparecchiatura, il che conferisce ai motori a corrente continua un vantaggio in termini di convenienza economica.

Lo svantaggio principale di un motore a corrente continua invece risiede nella sua struttura complessa, che aumenta la probabilità di guasti. I motori a corrente continua hanno avvolgimenti complessi, come l'avvolgimento di eccitazione, l'avvolgimento del polo di commutazione, l'avvolgimento di compensazione e l'avvolgimento di armatura, oltre a componenti aggiuntivi come collettori rotanti, spazzole e commutatori. Ciò comporta elevati requisiti di produzione e costi di manutenzione relativamente alti e frequenti a causa dell'usura delle spazzole a causa del contatto strisciante e la possibilità che si instaurino scintille durante la commutazione da cui deriva anche un limite alla velocità raggiungibile.

In sintesi gli svantaggi di questo tipo di motori rispetto ad altre tipologie sono:

- **Efficienza e Durabilità Inferiori:** I motori DC hanno una bassa efficienza rispetto ai PMSM e richiedono manutenzione costante per il sistema di spazzole, che si usurano nel tempo.

- Bassa Densità di Potenza: Rispetto ai PMSM, i motori a corrente continua sono meno compatti e più pesanti a parità di potenza, il che limita la loro applicabilità nelle moderne vetture elettriche.
- Limite di velocità legato alla commutazione del collettore per evitare delle scariche di corrente che possano compromettere il funzionamento delle spazzole.

3.3 Motori asincroni o a Induzione

3.3.1 Struttura

I motori asincroni, anche conosciuti come motori a induzione, sono tra i più diffusi per applicazioni industriali generali. Essi funzionano tramite un campo magnetico rotante che induce corrente nel rotore. Lo statore è costituito da un nucleo di ferro e dall'avvolgimento trifase; il rotore utilizza spesso un rotore a gabbia di scoiattolo, che comprende un nucleo di ferro e l'avvolgimento a gabbia di scoiattolo.



Figura 13. Struttura di un motore a induzione [7].

3.3.2 Principio di funzionamento del motore asincrono in c.a.

Innanzitutto lo statore fornisce un campo magnetico rotante facendo circolare la corrente alternata trifase di alimentazione attraverso la bobina statorica, creando un campo magnetico rotante. Gli avvolgimenti trifase dello statore devono essere simmetrici e il nucleo di ferro dello statore deve essere distanziato di 120 gradi elettrici. Così facendo anche la corrente che attraversa gli avvolgimenti trifase simmetrici sarà simmetrica, con la stessa dimensione, frequenza e differenza di fase di 120 gradi. La velocità di rotazione del campo magnetico rotante è data dall'equazione:

$$n_s = \frac{60 f}{p}$$

In questa equazione, n_s è la velocità di rotazione del campo magnetico rotante, nota anche come velocità sincrona in rpm, f è la frequenza della corrente alternata trifase in [Hz], p è il numero di coppie di poli. Per un motore progettato e messo in produzione, il numero di coppie di poli è fisso; quindi, il fattore che determina la velocità di rotazione del campo magnetico è la frequenza della corrente alternata trifase.

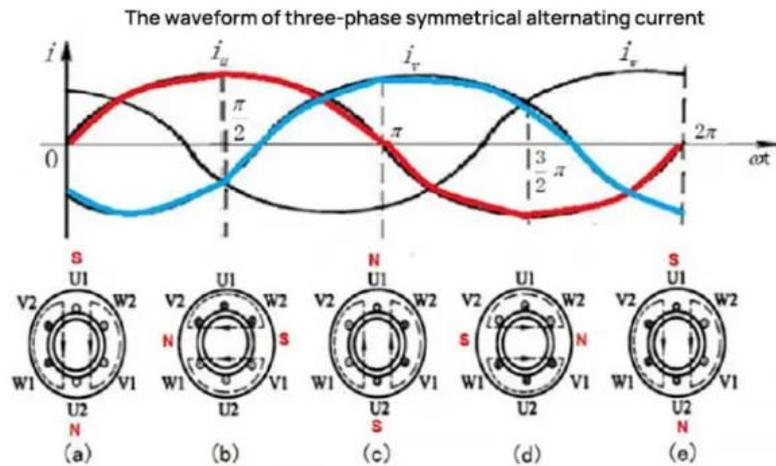


Figura 14. Diagramma del campo magnetico rotante prodotto dagli avvolgimenti di statore [7].

Successivamente sul rotore a gabbia di scoiattolo, essendo un conduttore immerso in un campo magnetico variabile, viene indotta una corrente parassita secondo la legge di Faraday, come illustrato nella Figura 15 sottostante.

Tali correnti interagiscono con il campo magnetico generato dalle correnti statoriche provocando nei conduttori di rotore delle forze tangenziali, le forze di Lorentz, che danno luogo ad una coppia risultante. Essendo tale coppia dovuta da correnti indotte che, per la legge di Lenz, si oppongono alla causa che le ha generate, essa tende a diminuire la velocità relativa tra campo magnetico e rotore, ossia a trascinare il rotore nello stesso verso del campo. In definitiva la coppia porta il rotore in rotazione ad una velocità n che, per la presenza di attriti, è minore di n_s anche in assenza di coppia resistente esterna applicata all'albero: tra campo di statore e rotore vi deve essere una velocità relativa tale che l'intensità delle correnti indotte sia sufficiente a sviluppare la coppia motrice necessaria a mantenere il motore in rotazione. In presenza di coppia resistente esterna, la rotazione viene frenata: aumenta la velocità relativa tra campo di statore e rotore, aumenta l'ampiezza delle correnti indotte e si stabilisce una nuova velocità n inferiore a quella precedente, in corrispondenza della quale la coppia prodotta dalle nuove correnti indotte sarà tale da equilibrare la coppia resistente esterna e quella dovuta agli attriti. Assunto come verso di rotazione positivo quello del campo rotante di statore, in corrispondenza di una generica velocità n del rotore la velocità relativa tra campo rotante e rotore vale $(n_s - n)$ e la frequenza delle f.e.m indotte nei conduttori di rotore sarà:

$$f = \frac{p (n_s - n)}{60}$$

Posto: $s = \frac{n_s - n}{n_s}$

si ha: $f = \frac{p s n_s}{60} = s f$

La grandezza adimensionale s è lo scorrimento ed indica quanto vale la velocità relativa.

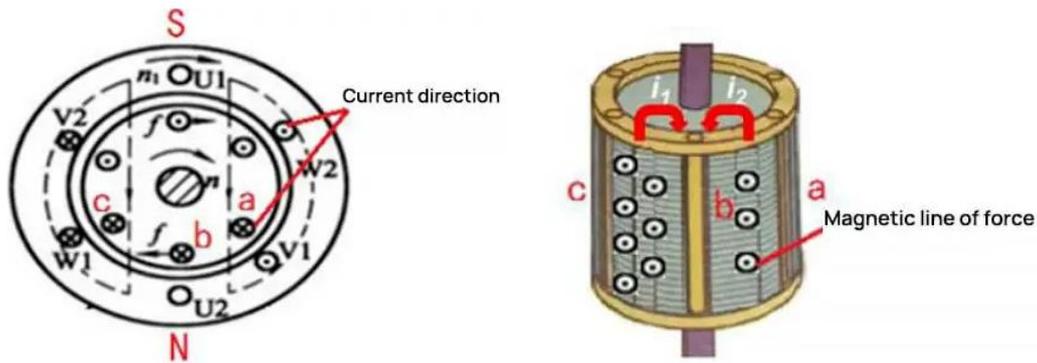


Figura 15. Correnti indotte e forza di Lorentz sul rotore [7].

3.3.3 Funzionamento da generatore

Secondo la legge di Faraday sull'induzione elettromagnetica, quando una sezione del conduttore del circuito chiuso attraversa le linee del campo magnetico in movimento, si genera una corrente indotta all'interno del conduttore, con la forza elettromotrice generata nota come forza elettromotrice indotta.

In un motore asincrono in corrente alternata, quando il motore viene utilizzato come generatore, lo statore viene eccitato con una corrente trifase per fornire il campo magnetico e l'avvolgimento del rotore fornisce il conduttore. Quindi quando una forza meccanica esterna, come l'albero motore di un'automobile, aziona l'albero del rotore, facendolo muovere, se la velocità del rotore è superiore alla velocità sincrona del campo magnetico rotante dello statore, il motore asincrono CA si comporta come un generatore ed inizia a produrre energia elettrica. La direzione del rotore che taglia il campo magnetico rotante è opposta a quella del motore di azionamento, quindi anche la direzione della forza elettromotrice indotta dal rotore è invertita. Inoltre durante il processo di generazione dell'energia, il rotore del motore subisce una coppia elettromagnetica opposta alla forza di trascinamento esterna, causando una diminuzione della velocità del rotore. Questo funzionamento infatti è utilizzato nei veicoli nelle frenate rigenerative o a recupero di energia.

3.3.4 Vantaggi, svantaggi e applicazioni dei motori asincroni in c.a.

I vantaggi dei motori asincroni sono la semplicità della struttura, la stabilità delle prestazioni, la facilità di manutenzione e il basso costo.

I motori asincroni si dividono in motori a gabbia di scoiattolo e motori avvolti, con la differenza principale nel rotore. Il rotore di un motore a gabbia di scoiattolo è costituito da strisce di metallo, come rame o alluminio. L'alluminio è relativamente economico e ampiamente utilizzato in applicazioni a bassa domanda. Il rame, invece, ha migliori proprietà meccaniche ed elettriche ed è più comunemente utilizzato nei rotor. Rispetto ai motori a gabbia di scoiattolo, i motori asincroni avvolti hanno componenti aggiuntivi come anelli di scorrimento e resistenza elettrica, che comportano un costo complessivo più elevato. I motori asincroni hanno inoltre un intervallo di regolazione della velocità relativamente ristretto e una coppia ridotta rispetto ai motori a corrente continua. Tuttavia, i motori a gabbia di scoiattolo hanno una bassa coppia in uscita e una corrente di avviamento elevata, che li rende inadatti a carichi che richiedono una coppia di avviamento elevata.

In sintesi gli svantaggi di questo tipo di motori rispetto ad altre tipologie sono:

- **Efficienza Inferiore:** Rispetto al PMSM, il motore a induzione presenta un'efficienza inferiore, in parte a causa delle perdite di energia causate dalla resistenza nel rotore e dalle correnti indotte. Questo comporta un maggiore consumo di energia, con impatti negativi sulle prestazioni e sull'autonomia del veicolo elettrico.
- **Densità di Potenza Inferiore:** I motori a induzione tendono a essere più grandi e più pesanti rispetto ai PMSM per una data potenza erogata, limitando la capacità di offrire elevate prestazioni in uno spazio compatto.

3.4 Motore Sincrono a Magneti Permanenti (PMSM)

3.4.1 Struttura del motore sincrono a magneti permanenti

I motori sincroni a magneti permanenti, detti anche “brushless a f.e.m. sinusoidale”, sono caratterizzati dall'uso di magneti permanenti nel rotore, che eliminano la necessità di un sistema di eccitazione esterna, come nel caso dei motori sincroni tradizionali. Questi motori operano in sincronia con la frequenza di alimentazione e sono noti per la loro alta efficienza, elevata densità di potenza e il controllo preciso della velocità.

La loro struttura è composta da uno statore che comprende un nucleo di ferro e degli avvolgimenti trifase e dal rotore costituito da poli di magneti permanenti. La disposizione dei magneti permanenti nel rotore può essere: montati in superficie, incorporati in superficie e interni.



Figura 16. Struttura motore sincrono brushless [7].

3.4.2 Principio di funzionamento del motore sincrono a magneti permanenti

In un motore sincrono il campo magnetico rotante è fornito dallo statore, prodotto allo stesso modo e alla stessa velocità di un motore asincrono a corrente alternata. I poli magnetici sono forniti dai magneti permanenti del rotore. In questo modo, il campo magnetico rotante generato dallo statore forma un circuito con i poli del magnete permanente e il nucleo di ferro del rotore. In base al principio della minima riluttanza magnetica, secondo cui il flusso magnetico si chiude sempre lungo il percorso di minor resistenza magnetica, il rotore viene trascinato in rotazione dalla forza elettromagnetica del campo rotante. Di conseguenza, il rotore a magneti permanenti ruota in modo sincrono con il campo magnetico rotante generato dallo statore, azionando così la rotazione dell'albero motore.

3.4.3 Funzionamento da generatore

In base alla legge di Faraday sull'induzione elettromagnetica, una parte del conduttore del circuito chiuso è fornita dagli avvolgimenti trifase dello statore, mentre il campo magnetico è fornito dai magneti permanenti del rotore. Quando la coppia esterna fa ruotare il rotore, questo genera un campo magnetico rotante che taglia parte dei conduttori degli avvolgimenti trifase dello statore e induce una corrente trifase simmetrica. A questo punto, l'energia cinetica del rotore viene convertita in energia elettrica e il motore sincrono a magneti permanenti funziona come un generatore.

3.4.4 Vantaggi, svantaggi e campo di applicazione del motore sincrono a magneti permanenti

L'elemento caratterizzante di tali motori è la presenza di magneti permanenti nel rotore, dai quali dipende funzionamento, tipologia e costo dello stesso. Con questa tipologia di motori si riduce notevolmente la necessità di manutenzione periodica (anche per questo motivo trova una grandissima applicazione sia in campo industriale che in campo domestico), infatti viene a mancare la presenza delle spazzole che si hanno per esempio nei motori a corrente continua. Un altro aspetto rilevante riguarda le dimensioni del motore stesso, spesso "limitate" rispetto alla potenza che possono erogare. In più il motore sincrono a magneti permanenti si sincronizza rigorosamente e ha buone prestazioni di risposta dinamica, adatte al controllo della frequenza; la coppia e la velocità del motore possono essere regolate in un ampio intervallo modificando la corrente e la frequenza.

Per contro, uno svantaggio di questo tipo di motori sta nel fatto che non possono essere avviati direttamente e richiedono metodi di avviamento asincroni o a frequenza variabile. L'avviamento asincrono prevede l'installazione di un avvolgimento di avviamento simile a un avvolgimento a gabbia di un motore asincrono sul rotore. Invece l'avviamento a frequenza variabile è reso possibile dall'implementazione di elettronica di potenza, ovvero variando la frequenza di alimentazione progressivamente permettendo al motore di accelerare gradualmente. Questo aspetto si traduce quindi un incremento economico sul costo finale della macchina. Inoltre, sul prezzo finale del motore stesso incide il materiale con cui sono realizzati i magneti, solitamente un materiale magnetico al neodimio, ferro e boro, che è anche relativamente fragile e può rompersi in caso di vibrazioni intense. In aggiunta, l'uso di materiale a magneti permanenti nel rotore può portare a un decadimento magnetico nel funzionamento del motore e a situazioni di surriscaldamento, con conseguente diminuzione della potenza.

I motori sincroni sono utilizzati principalmente in applicazioni quali paranchi, mulini, ventilatori, compressori, laminatoi e pompe idrauliche. Il principio di selezione dei motori è quello di privilegiare i motori con strutture semplici, prezzi bassi, funzionamento affidabile e manutenzione conveniente, a condizione che le prestazioni del motore soddisfino i requisiti dei macchinari di produzione.

In sintesi i principali vantaggi di questi motori sono:

1. **Alta Efficienza:** I PMSM sono tra i motori più efficienti disponibili, con perdite ridotte dovute all'assenza di corrente indotta nel rotore, come accade nei motori a induzione. Questo li rende particolarmente adatti per applicazioni in cui l'efficienza energetica è cruciale, come nei veicoli elettrici.

2. Elevata Densità di Potenza: Grazie ai magneti permanenti, il PMSM offre una maggiore densità di potenza rispetto ai motori a induzione e altri motori sincroni, permettendo di ottenere prestazioni elevate in spazi più compatti e con un peso ridotto.
3. Controllo Preciso della Velocità: Il PMSM può mantenere una velocità costante anche sotto carichi variabili, rendendolo ideale per applicazioni che richiedono un controllo preciso della velocità, come nei veicoli elettrici, dove la risposta rapida e precisa ai comandi è essenziale per il comfort e la sicurezza.
4. Bassa Manutenzione: L'assenza di spazzole e di un sistema di eccitazione nel rotore riduce i requisiti di manutenzione, aumentando l'affidabilità e la durata del motore, un aspetto cruciale per i veicoli elettrici che devono operare per lunghi periodi senza interventi frequenti.
5. Rispetto per l'Ambiente: L'elevata efficienza e la riduzione delle perdite di energia contribuiscono a minori consumi elettrici e a una riduzione delle emissioni indirette di CO₂, rendendo i PMSM una scelta ottimale in un contesto di sostenibilità energetica.

3.4.5 Conclusione sul confronto

Il motore sincrono a magneti permanenti (PMSM) emerge come la soluzione ottimale in ambito automotive, grazie alla sua combinazione unica di alta efficienza, densità di potenza elevata, controllo preciso della velocità e minimi requisiti di manutenzione. Sebbene tecnologie alternative, come i motori a induzione o a corrente continua, possiedano vantaggi in specifiche applicazioni industriali, il PMSM è il motore ideale per applicazioni che richiedono elevate prestazioni, affidabilità e sostenibilità energetica, come i veicoli elettrici moderni. Dunque le sue caratteristiche lo rendono non solo una scelta vantaggiosa per ridurre i consumi energetici e le emissioni, ma anche una tecnologia fondamentale per il futuro della mobilità elettrica.

Infatti, facendo un confronto con un motore in corrente continua, la presenza di tali magneti permette di non utilizzare spazzole e collettore, organi necessari per i motori con avvolgimenti di eccitazione per poter addurre corrente al motore. L'assenza di spazzole e collettore comporta una diminuzione del momento di inerzia del rotore, aspetto vantaggioso, oltre che per una diminuzione del peso della macchina, perché è possibile raggiungere velocità maggiori a pari energia di alimentazione. In più un ulteriore vantaggio è il fatto che non è presente alcun limite di velocità legato alla commutazione del collettore, limite presente nel motore a corrente continua per evitare delle scariche di corrente che possano compromettere il funzionamento delle spazzole.

Invece, rispetto ad un motore sincrono ad eccitazione sul rotore il motore brushless ha il vantaggio di non essere dotato di un circuito di eccitazione, necessario per creare il campo magnetico rotorico, evitando così perdite nel rame, aumentando quindi il rendimento della macchina.

Infine rispetto a motori ad induzione, il cui vettore rotante della corrente statorica è composto da due componenti ortogonali, una di magnetizzazione che genera il flusso di rotore ed una di coppia che genera la coppia elettromagnetica al traferro, nei motori sincroni a magneti permanenti l'uso dei magneti, che sostituiscono l'avvolgimento di eccitazione delle macchine sincrone convenzionali, rende non necessaria la componente magnetizzante del vettore della corrente statorica. Di

conseguenza, a parità di condizioni di carico, il PMSM funziona a un più elevato fattore di potenza e con un rendimento maggiore rispetto ad un motore ad induzione.

D'altra parte gli svantaggi nell'uso del motore brushless sono tendenzialmente dal punto di vista economico, poiché i magneti hanno un costo elevato. Inoltre un altro aspetto svantaggioso è il fatto che non è possibile variare il campo magnetico dei magneti permanenti, e quindi il flusso da esso generato; per questo motivo, nel caso di funzionamento del motore in deflussaggio è necessario produrre un flusso di statore che, sommandosi con il flusso di rotore, genera un flusso totale controllabile. Tuttavia, questa operazione può essere delicata perché, se presenti correnti elevate, può portare alla smagnetizzazione dei magneti per temperature elevate.

CAPITOLO 4: MOTORI SINCRONI BRUSCHLESS

In questo capitolo verranno trattati i motori elettrici sincroni a magneti permanenti essendo la tipologia di motori utilizzati nell'attività di tesi ed in particolare verranno descritti i seguenti aspetti:

- Struttura e principio di funzionamento
- Caratteristica meccanica
- Tecnica di controllo FOC

4.1 Generalità

In passato il motore sincrono era considerato un motore a velocità costante (la velocità di sincronismo), dipendente dalla frequenza di alimentazione e dal numero di coppie polari. Per tale motivo esso era considerato inadatto alla realizzazione di azionamenti elettrici a velocità variabile e la sua applicazione era limitata a quei settori in cui non era richiesto un controllo di velocità e/o posizione. Le macchine sincrone trovarono largo impiego come generatori piuttosto che come motori; ancora oggi quasi tutti i generatori elettrici in c.a. sono sincroni e quasi tutta la potenza elettrica impegnata negli impianti di potenza è generata dai sincroni.

Il notevole sviluppo che si è avuto negli ultimi decenni nel campo dell'elettronica di potenza ha consentito la realizzazione pratica ed economica di sorgenti di alimentazione in c.a. a frequenza e tensione variabili. Di conseguenza è divenuto possibile l'impiego di motori in c.a., sia sincroni che asincroni, nel campo degli azionamenti elettrici a velocità variabile.

Negli ultimi anni è andato continuamente crescendo l'interesse nei confronti del motore sincrono a magneti permanenti, grazie ai numerosi vantaggi che esso presenta rispetto ad altre macchine, sia in c.c. che in c.a. come descritto nel capitolo precedente.

Le principali caratteristiche possedute dai PMSM possono infine essere così riassunte:

- Elevata densità di flusso al traferro.
- Elevato rapporto potenza/peso.
- Piccole oscillazioni di coppia anche a velocità molto basse, il che consente di ottenere notevole accuratezza nel posizionamento.
- Ampio campo di variazione della velocità.

- Possibilità di funzionamento a coppie elevate, che permette di ottenere rapide accelerazioni e decelerazioni.
- Alto rendimento ed alto fattore di potenza.
- Struttura compatta.

4.2 Struttura e funzionamento motore sincrono brushless

Il motore sincrono a magneti permanenti è composto da uno statore, parte fissa dove sono alloggiati gli avvolgimenti statorici alimentati da corrente alternata, ed un rotore, ovvero la parte mobile che ospitano i magneti permanenti. In particolare, il principio di funzionamento di questo motore è basato sul sincronismo tra il campo magnetico rotante di statore, generato grazie alla eccitazione tramite corrente alternata dei tre avvolgimenti statorici sfasati di 120° , e quello di statore generato dai magneti permanenti. Dunque i due campi magnetici concatenandosi ruotano alla stessa velocità (velocità di sincronismo), e producono una interazione tra loro che produce una coppia meccanica.

In particolare, se viene imposto tramite corrente e tensione delle fasi statoriche un campo magnetico di statore B_s disallineato con quello di rotore si genera una coppia proporzionale, oltre che ai moduli B_s e B_r , allo sfasamento dei due vettori: in particolare, fissati i moduli dei campi magnetici, la coppia massima si ha con uno sfasamento di 90° .

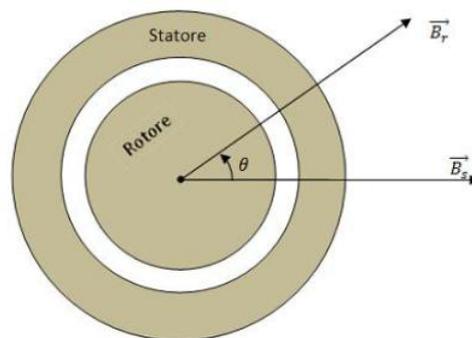


Figura 17. Fasori campo magnetico di rotore e di statore.

La situazione rappresentata esplicita ulteriormente il fatto che, se i campi magnetici sono sfasati tra loro, viene generata una coppia agente per allinearli; infatti, le interazioni magnetiche tra rotore e statore fanno sì che le zone con medesima polarità si allontanino, mentre si attraggono le zone con opposta polarità. Si genera quindi una coppia di forze che permette la rotazione del rotore come rappresentato di seguito:

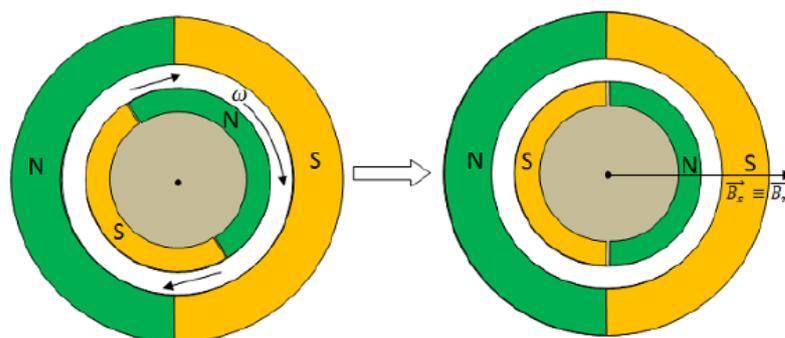


Figura 18. Coppia di forze magnetiche e rotazione del rotore.

In questo modo, si evince che, se con una particolare alimentazione delle fasi viene generato un fasore spaziale di statore rotante a velocità ω , si potrà imporre una rotazione meccanica al rotore. La velocità meccanica Ω del motore sarà proporzionale alla velocità angolare di B_s , si ha infatti:

$$\Omega = \frac{\omega}{n}$$

Con n numero di paia poli presenti sullo statore, ovvero il numero di coppie magnetiche nord e sud presenti nello statore che varia in base al numero di avvolgimenti, alla loro distribuzione, al numero delle cave e alla loro distribuzione. È interessante, ora, visto come è possibile applicare una rotazione al motore, osservare come si può generare un campo magnetico di statore rotante.

Considerando solo un avvolgimento di statore, si può generare un campo magnetico, la cui direzione e verso sono fissi, e con modulo proporzionale all'intensità di corrente. Si ricorda infatti che il campo magnetico, analizzando il circuito magnetico al traferro, ha modulo:

$$B_s = \frac{2}{\pi * t} * \mu * n * i$$

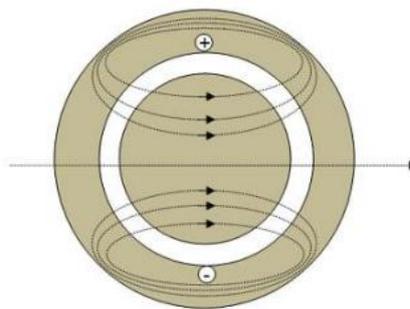


Figura 19. Flusso magnetico prodotto dalla corrente di statore.

Con t spessore del traferro, μ permeabilità magnetica e n numero di paia poli. Si considerino ora 3 avvolgimenti sfasati di 120° . Poiché il campo magnetico è proporzionale alla corrente, ricavare il fasore spaziale della corrente statorica equivale a trovare direzione e verso del vettore campo magnetico di statore. Poiché gli avvolgimenti sono collegati a stella, per la legge di Kirchhoff la somma delle tre correnti è nulla. Vengono quindi imposte, ad esempio:

$$i_a = I_m \qquad i_b = -\frac{I_m}{2} \qquad i_c = -\frac{I_m}{2}$$

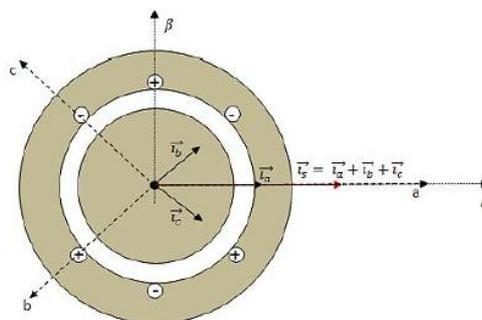


Figura 20. Composizione vettoriale delle correnti.

In base, quindi, alle correnti di fase, si ha un differente fasore spaziale di corrente statorica i_s . Per comodità, il vettore spaziale i_s può essere scomposto sugli assi α e β rappresentati in figura 20. In particolare, se vengono imposte delle correnti sinusoidali con periodo $\theta = \omega t$ ottengo il seguente fasore spaziale della corrente:

$$|\vec{i}_s| = i_s = \sqrt{\frac{2}{3}} * \left(i_a + i_b * e^{j\frac{2}{3}\pi} + i_c * e^{j\frac{4}{3}\pi} \right)$$

con $\sqrt{\frac{2}{3}}$ coefficiente caratteristico per i fasori razionali.

Considerando:

$$i_a = I_m * \cos(\omega t)$$

$$i_b = I_m * \cos\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) = I_m \left(-\frac{1}{2} * \cos(\omega t) + \frac{\sqrt{3}}{2} * \sin(\omega t) \right)$$

$$i_c = I_m * \cos\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right) = I_m \left(-\frac{1}{2} * \cos(\omega t) - \frac{\sqrt{3}}{2} * \sin(\omega t) \right)$$

$$i_s = \sqrt{\frac{2}{3}} * I_m * \frac{3}{2} * e^{j\omega t} = \sqrt{\frac{3}{2}} * I_m * e^{j\omega t}$$

Si nota come il fasore di corrente ruoti con pulsazione ω , quindi pari alla pulsazione dell'onda sinusoidale di corrente.

Il fasore spaziale di campo magnetico è sovrapposto al fasore di corrente, poiché campo magnetico e corrente sono proporzionali. Quindi, il campo magnetico ruota anch'esso di pulsazione ω ; questo risultato comporta, come visto in precedenza, alla rotazione del rotore, quindi viene generata energia meccanica. Infatti, poiché il campo magnetico statorico è rotante e, allo stesso tempo il campo magnetico rotorico è fisso, non appena vi è uno sfasamento tra i campi viene generata una coppia che tende ad allinearli: poiché, come detto, il campo magnetico di rotore non può ruotare, essendo i magneti permanenti fissati, la coppia produce una rotazione meccanica del rotore.

Se al rotore viene aggiunto un carico di inerzia J_{load} , la coppia d'inerzia del motore risulta:

$$T_{inerzia\ motore} = (J_{load} + J_{rot}) * \frac{d}{dt} \omega$$

Osservato come è possibile produrre coppia meccanica tramite un motore brushless, viene ora esplicitata l'espressione della coppia meccanica del motore in funzione delle grandezze elettriche che lo alimentano. La formula proviene da un bilancio di potenza proveniente dalle equazioni elettriche di statore delle tre fasi, dalla quale, considerando che la macchina ruota alla velocità del campo magnetico statorico, è possibile dedurre l'espressione finale della coppia meccanica prodotta:

$$C_{m,MAX} = \frac{3p}{\omega_s^2 L_s} V_s E_0 \sin(\delta)$$

Dove p è il numero di coppie polari, ω_s è la velocità di sincronismo, ovvero la velocità del campo magnetico rotante di statore, V_s è la tensione di alimentazione, E_0 è la forza elettromotrice a vuoto, ovvero il valore efficace delle tensioni che si ottengono nelle fasi di statore se il rotore viene portata in rotazione con i morsetti statorici aperti, ed infine δ è l'angolo di calettamento o di coppia, cioè l'angolo tra la fem a vuoto E_0 e la tensione di statore V_s .

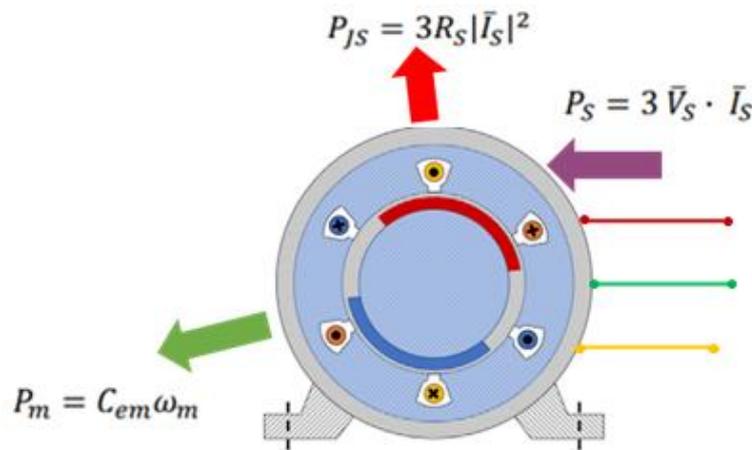


Figura 21. Bilancio di potenza nel motore sincrono brushless [13].

Dunque in condizione di sincronismo, fissate ampiezza V_s e pulsazione ω_s della tensione di statore, e fissata la FEM E_0 , la coppia è proporzionale al seno dell'angolo di calettamento (o di coppia).

Quindi una coppia elettromagnetica maggiore della coppia resistente produce una accelerazione del rotore e quindi l'angolo δ decresce. Una coppia elettromagnetica minore della coppia resistente produce una decelerazione del rotore e quindi l'angolo δ cresce

La coppia di pull-out è la massima coppia sviluppabile (data una condizione di alimentazione di statore e rotore) e si raggiunge quando $\delta = \pi/2$, e se la coppia resistente supera la coppia di pull-out vi è la perdita del sincronismo (perdita del passo). In questa condizione corrisponde un aumento anomalo della corrente di statore (senza che determini un aumento di coppia sviluppata) e un andamento pulsante della coppia.

$$C_{m,MAX} = \frac{3p}{\omega_s^2 L_s} V_s E_0$$

4.3 Caratteristica meccanica

La caratteristica meccanica (curva $C-\omega$) di questo motore è un segmento verticale alla velocità di sincronismo, che dipende solo dalla frequenza elettrica della corrente sullo statore e dal numero di poli del motore secondo la seguente equazione:

$$n = \frac{60 f}{p}$$

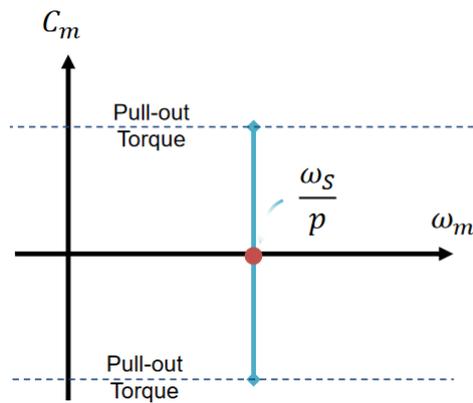


Figura 22. Caratteristica meccanica [13].

Quindi il motore genera coppia solo alla velocità di sincronismo, la quale può essere variata tramite l'utilizzo di un inverter variando la frequenza di alimentazione. In questo modo il motore può sviluppare un alto valore di coppia in un ampio range di velocità ed inoltre è capace anche di autoavviarsi.

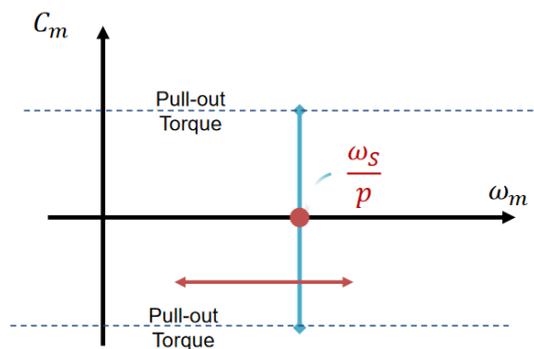


Figura 23. Caratteristica meccanica al variare della frequenza di alimentazione [13].

Il punto di funzionamento si determina intersecando la caratteristica meccanica del motore con quella del carico, ed al variare di quest'ultimo la variazione di coppia prodotta non modifica la velocità del motore ma solo l'angolo di sfasamento tra campo magnetico di statore e rotore fino a raggiungere il valore di coppia massima dopo il quale il motore perderebbe la sincronizzazione.

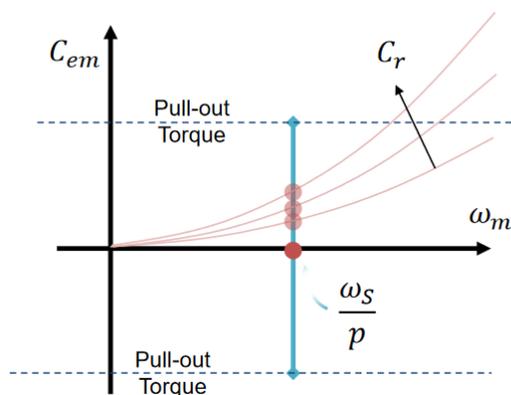


Figura 24. Punto funzionamento al variare della coppia resistente [13].

Successivamente si analizza come si modifica la caratteristica meccanica della macchina sincrona al variare dell'ampiezza e della frequenza di alimentazione della tensione di alimentazione. Per fare ciò è riportata l'equazione della coppia massima producibile da motore, ovvero quando l'angolo di sfasamento tra campo magnetico di statore e rotore è di 90 deg:

$$C_{m,MAX} = \frac{3p}{L_s} \varphi_E \left(\frac{V_s}{\omega_s} \right)$$

Dunque si può affermare che mantenendo il rapporto V_s/ω_s costante è possibile spostare la caratteristica meccanica mantenendo la coppia massima costante fino a quando si arriva al valore di tensione e velocità nominale, dopo il quale un aumento ulteriore della velocità causa il calo del rapporto precedentemente citato e quindi un calo della coppia producibile. Questo funzionamento appena descritto ci permette di individuare due zone di funzionamento nel piano $C-\omega$, un primo tratto a coppia costante, dove variando la velocità si mantiene costante la coppia massima fino ad arrivare alla velocità nominale del motore, ed un successivo tratto a potenza costante, dove invece aumentando la velocità si provoca una diminuzione della coppia mantenendo il loro rapporto, quindi la potenza, costante.

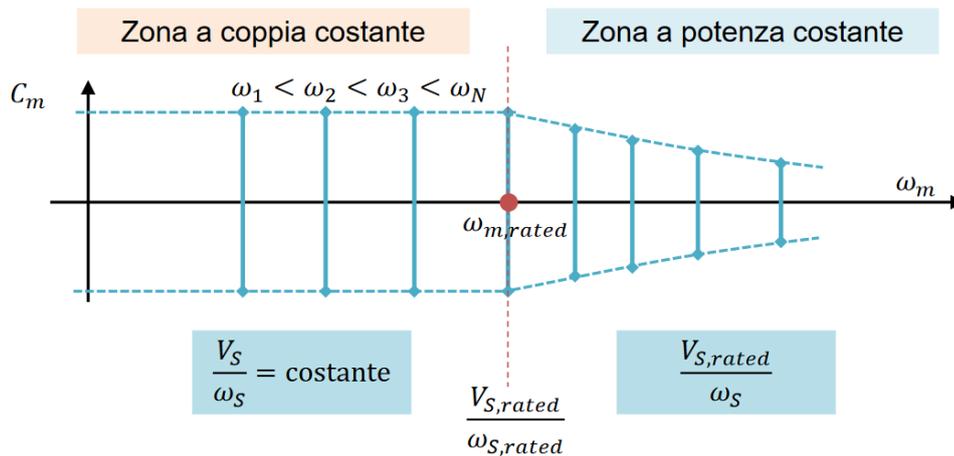


Figura 25. Zone funzionamento motore [13].

CAPITOLO 5: COMUNICAZIONE CAN

Nel seguente capitolo sarà descritto come funziona una comunicazione CAN per comunicare con il motore in modo da controllarlo nella fase di test. Tale tipologia di controllo è stata scelta in modo da simulare un reale controllo tipicamente gestito dalla unità di controllo, ovvero la VCU (“Veicle Control Unit”) nella reale applicazione in vettura.

5.1 Introduzione alla Comunicazione CAN (Controller Area Network)

La Controller Area Network (CAN) è uno standard di comunicazione robusto e altamente efficiente progettato per la comunicazione tra dispositivi elettronici all'interno di un sistema embedded, come i veicoli o altre applicazioni industriali. Originariamente sviluppato da Bosch negli anni '80, il protocollo CAN è oggi uno degli standard più utilizzati nei sistemi automobilistici, nell'automazione industriale e nelle applicazioni di controllo, inclusi i motori elettrici.

CAN è un protocollo di comunicazione seriale che consente la trasmissione di messaggi tra dispositivi (noti come nodi o dispositivi CAN), senza la necessità di un controller centrale. La sua caratteristica principale è la comunicazione “peer-to-peer”, in cui ogni nodo della rete può inviare e ricevere messaggi, ma non richiede un master per coordinare il flusso di dati.

5.2 Funzionamento del CAN Bus

Il CAN Bus è una rete di comunicazione che utilizza una coppia di fili “twisted-pair” (due fili intrecciati) per trasmettere segnali di dati. I due cavi sono identificati con il nome di CAN_H (high) e CAN_L (low) e sono intrecciati tra loro e in controfase, ovvero trasportano la stessa informazione uguale ma opposta: mentre nel cavo CAN_H vi è l'informazione binaria 0 sul cavo CAN_L vi è l'informazione binaria 1. Tipicamente entrambe i segnali hanno ampiezza 1V e sono centrati su di una tensione pari a 2,5V. La rete CAN, pertanto, è basata sulla differenza tra il segnale CAN_H e il segnale CAN_L e il risultato può essere solamente 0V o 2V generando quindi l'informazione binaria finale. Questa tecnica porta con sé un grande vantaggio: l'immunità ai disturbi di natura elettromagnetica. Infatti, essendo i due cavi intrecciati tra loro, se vi è presenza di un disturbo questo si ripercuote in modo uguale su entrambe i canali e di conseguenza, la differenza porterà sempre a 0V o 2V.

Dunque, questo protocollo consente di inviare pacchetti di dati tra i dispositivi a velocità elevate, mantenendo alta l'affidabilità anche in ambienti industriali o automobili dove le interferenze elettromagnetiche sono frequenti.

Un'architettura CAN Bus tipica include:

- Nodi: Ogni dispositivo (come un motore, un sensore, un controller) sulla rete.
- Bus: Il mezzo di comunicazione (coppia di fili) che collega tutti i nodi.

- **Controllore CAN:** Ogni dispositivo che comunica su una rete CAN possiede un modulo di comunicazione CAN, chiamato Controller CAN. Esso gestisce la comunicazione con gli altri nodi.

5.3 Frame di Comunicazione CAN

La trasmissione dei dati in CAN avviene tramite frame di vari tipi. Ogni frame è composto da diverse sezioni, che includono informazioni come l'identificatore del messaggio, i dati effettivi, e una sequenza di controllo per garantire la corretta ricezione e integrità del messaggio. Le principali sezioni di un frame CAN sono:

1. **Start of Frame:** Indica l'inizio del frame.
2. **Identificatore:** Un campo che specifica l'identificatore del messaggio (ID). Più basso è il valore dell'ID, più alta è la priorità del messaggio.
3. **Controllo:** Include informazioni sulla lunghezza dei dati e sulla lunghezza del campo.
4. **Dati:** La parte del messaggio che trasporta le informazioni effettive.
5. **CRC (Cyclic Redundancy Check):** Un codice di controllo utilizzato per verificare l'integrità dei dati ricevuti.
6. **ACK (Acknowledge):** Un campo che conferma che il messaggio è stato ricevuto correttamente.
7. **End of Frame:** Segna la fine del frame.

Inoltre esistono diverse tipologie di frame CAN, le più comuni sono:

- **Data Frame:** Il frame principale che trasporta i dati reali tra i dispositivi.
- **Remote Frame:** Utilizzato per richiedere dati da un altro nodo senza fornire una risposta.
- **Error Frame:** Utilizzato per segnalare errori durante la comunicazione.
- **Overload Frame:** Utilizzato per segnalare il sovraccarico di un nodo.

5.4 Funzionamento del Bus CAN: Gestione dei Messaggi e Priorità

Una delle caratteristiche più importanti del CAN è la gestione della priorità dei messaggi. Il protocollo CAN utilizza il meccanismo di priorità basato sull'ID del messaggio. Più basso è l'ID, maggiore è la priorità del messaggio. Ad esempio, un messaggio con ID 0 ha la massima priorità, mentre uno con ID 7FF (l'ID massimo per il formato standard) ha la priorità più bassa.

Quando più dispositivi inviano dati sulla rete contemporaneamente, il protocollo CAN risolve i conflitti tramite un meccanismo chiamato "arbitration". L'arbitration avviene confrontando gli identificatori dei messaggi inviati e permettendo al messaggio con l'ID più basso di avere la precedenza, mentre gli altri messaggi vengono messi in attesa fino a quando la rete è libera. Questo meccanismo di arbitraggio garantisce che i messaggi più urgenti (quelli con ID più bassi) vengano inviati prima.

5.5 Vantaggi e Affidabilità del CAN Bus

CAN è noto per i seguenti vantaggi:

- Alta affidabilità: Grazie all'arbitraggio, i messaggi più importanti hanno sempre la priorità, e il protocollo è in grado di rilevare e correggere automaticamente gli errori di trasmissione.
- Velocità e bassa latenza: CAN è in grado di operare a velocità fino a 1 Mbps (nel caso di CAN 2.0), e la latenza dei messaggi è bassa.
- Resilienza alle interferenze: Il sistema è progettato per resistere alle interferenze elettromagnetiche, il che lo rende ideale per ambienti industriali o automotive.
- Bassa complessità del cablaggio: Poiché tutti i nodi sono collegati alla stessa linea di bus, è possibile ridurre notevolmente la complessità del cablaggio rispetto ad altri sistemi di comunicazione.

5.6 CAN Bus nel Controllo di Motori Elettrici

Nel contesto di un sistema di controllo di motori elettrici, come nel caso di un motore sincrono a magneti permanenti (PMSM), il CAN Bus è utilizzato per consentire la comunicazione tra il motore, il controller del motore, e altri dispositivi come sensori o unità di supervisione.

I principali messaggi che possono essere scambiati in un sistema di controllo motore tramite CAN includono:

- Messaggi di controllo del motore: possono essere inviati messaggi di input nel canale CAN per richiedere al motore un certo valore di velocità o coppia target da raggiungere dipendentemente da come viene controllato il motore.
- Messaggi di stato del motore: è possibile ricevere dal canale messaggi dal motore dove sono indicati tutti i valori dei parametri misurati dal motore come ad esempio velocità, coppia, corrente assorbita o generata, temperatura ed altre grandezze dipendentemente dai sensori di cui è fornito.
- Messaggi di errore: I dispositivi possono inviare messaggi di errore o stato di allarme, come ad esempio sovraccarichi, guasti o malfunzionamenti.

Dunque, nel contesto del controllo motore, l'architettura del sistema può essere composta da un controller principale (come un microcontrollore) che invia messaggi di controllo via CAN agli inverter che alimentano il motore. Allo stesso tempo, i sensori di velocità o di posizione del motore possono restituire informazioni tramite CAN. Il controller analizza questi dati e regola i segnali di controllo per ottimizzare il funzionamento del motore.

5.7 Implementazione della Comunicazione CAN in MATLAB

Matlab può essere utilizzato per creare un canale di comunicazione CAN e per inviare e ricevere messaggi tra il controller e il motore. In particolare Matlab supporta moduli CAN, come "CAN

Communication Toolbox”, che permettono di configurare e gestire una rete CAN, inviare messaggi e ricevere feedback dal motore.

Lo schema logico da seguire per implementare una comunicazione CAN in Matlab è illustrato nella figura sottostante, dove vengono esplicitate tutte le funzioni necessarie e come il programma riesce a gestire la trasmissione e la ricezione dei messaggi che circolano all’interno del canale.

Transmit Workflow

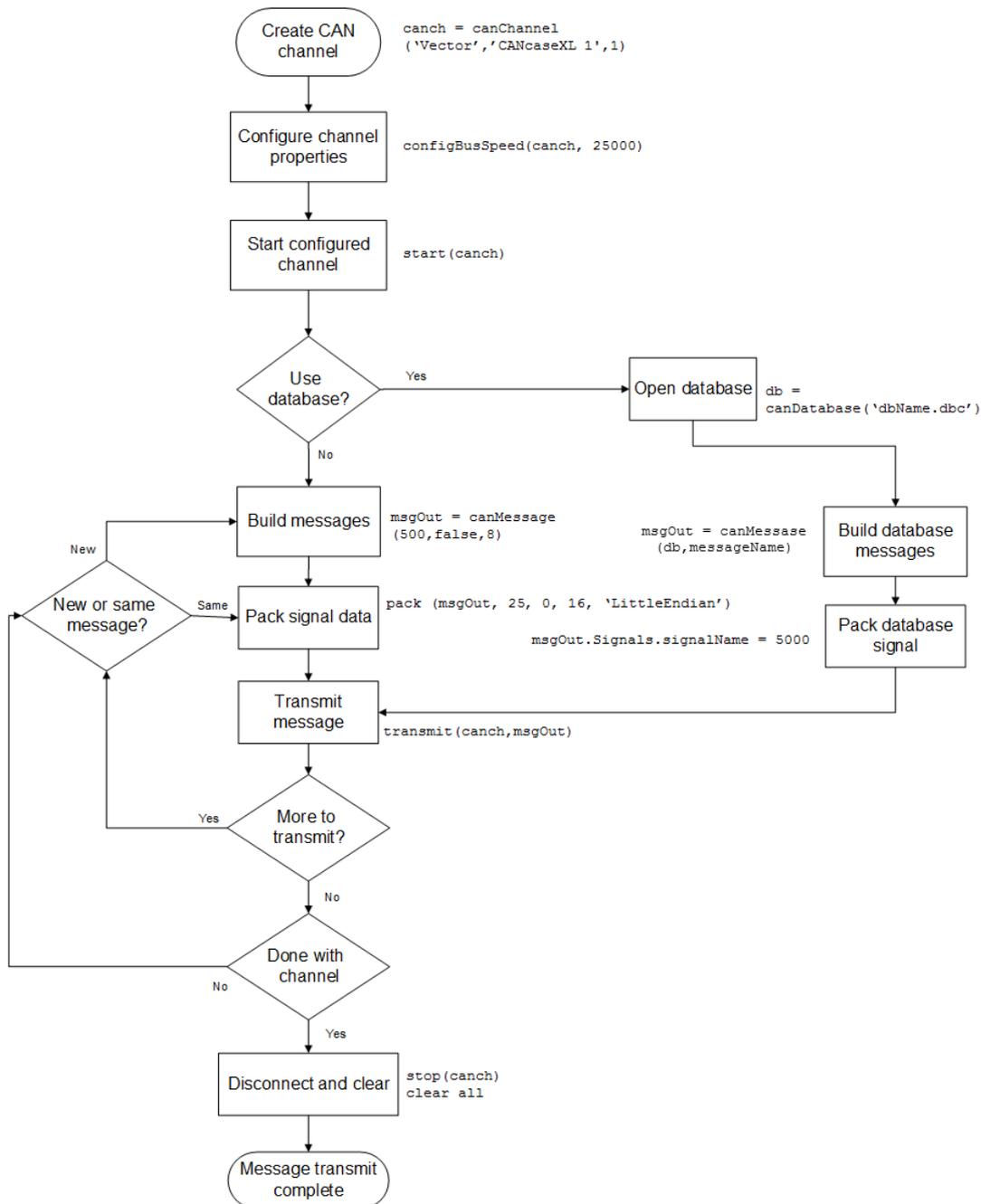


Figura 26. Schema funzionamento della trasmissione CAN in Matlab [10].

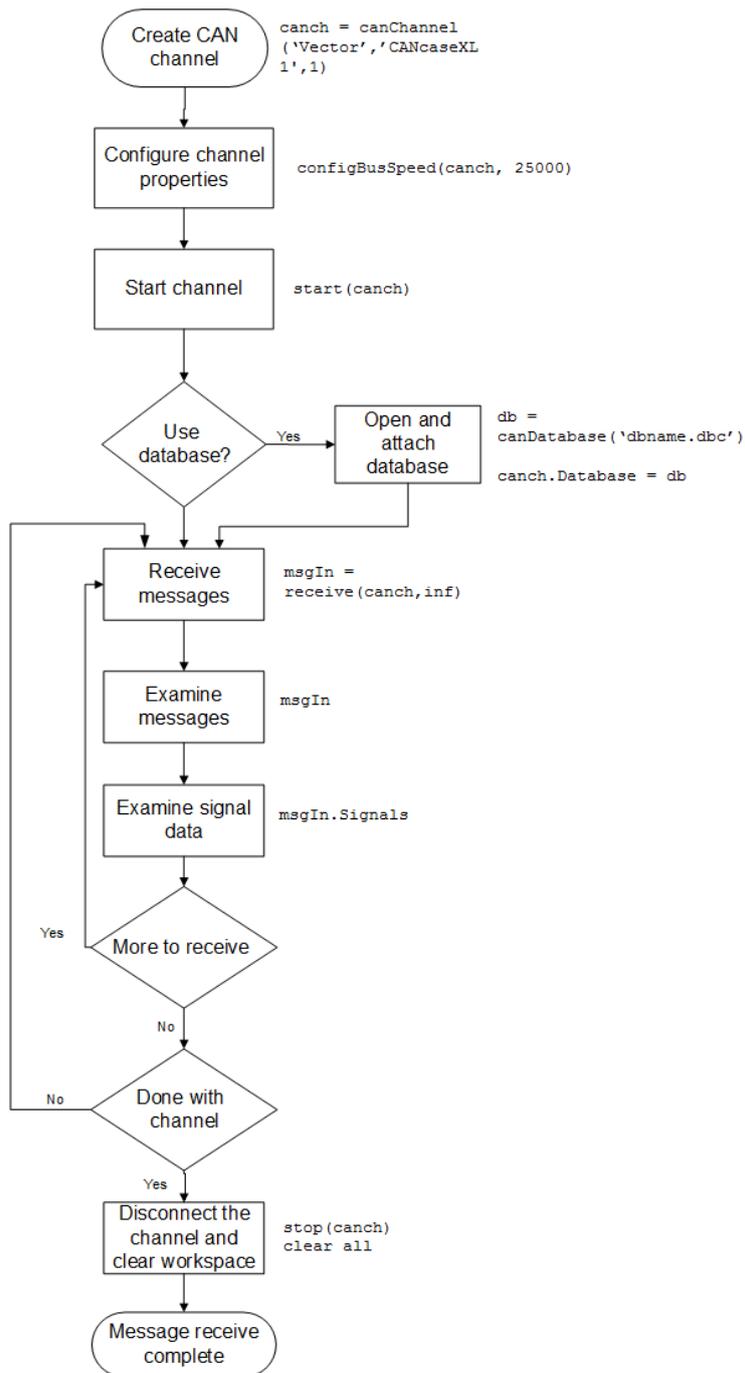
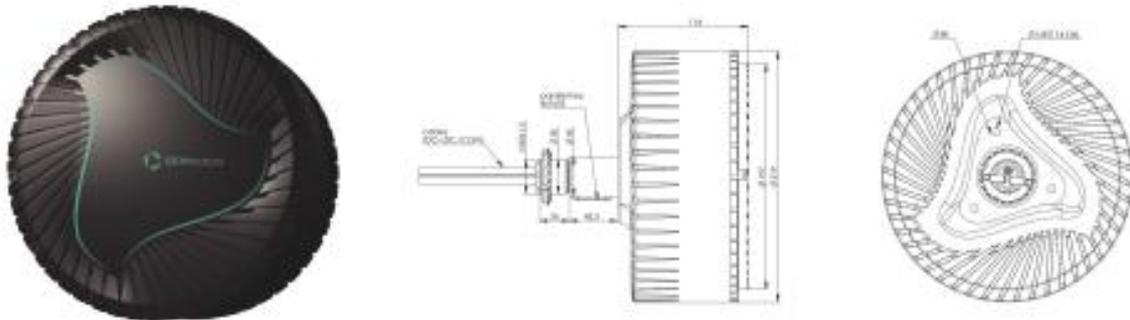


Figura 27. Schema funzionamento ricezione CAN in Matlab [11].

CAPITOLO 6: CABLAGGIO DEL MOTORE E SETUP DEL TEST

6.1 Scheda tecnica del motore

Il motore preso in considerazione durante l'attività di tesi come descritto precedentemente è un motore elettrico sincrono a magneti permanenti da 4,5 kW con controller integrato fornito da "Gem motors". La scheda tecnica è illustrata nella figura sottostante.



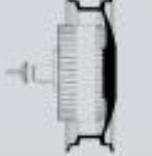
| | 0270 | 0440 | Custom |
|------------------------------------|--|--|--|
| |  |  |  |
| Nominal power | 3 kW | 3 kW | 2 – 4 kW |
| Nominal torque | 130 Nm | 100 Nm | 90 – 140 Nm |
| Peak power (20 sec) | 4.0 kW | 4.5 kW | 3 – 6 kW |
| Peak torque (20 sec) | 170 Nm | 140 Nm | 130 – 180 Nm |
| Max. speed | 400rpm at 48V DC | 700rpm at 48V DC | 150 – 800 rpm |
| Battery-to-wheel system efficiency | up to 91% | | up to 94% |
| Voltage | 48 V – 75 V max | | 24 V – 80 V |
| Wheel rim | Min size 30", integrated or external rim | | Custom integrated, custom rim mounting |
| Mounting | One- or double-sided | | Custom mounting |
| Cooling | Air | | |
| Dimensions | Width 110 mm, diameter 219 mm | | |
| Active motor weight | 7 kg | | |
| Total motor weight | 10,5 kg | | |
| Standard features | 4Q operation, FOC speed and torque control, regenerative braking | | |
| Motor controller | GEM modular type, integrated ® | | |
| Signal interface | CAN 2.0 or analog | | |
| IP Protection | IP 67 | | |
| Temperature range | - 40 – 60 °C | | |
| Applications | Bike, scooter, motorbike, other 2-, 3- or 4-wheeler applications, farm or cargo vehicles, robotic vehicles | | |

Figura 28. Scheda tecnica motore sincrono utilizzato.

6.2 Cablaggio del motore

I principali cavi di cui è dotato il motore necessari per alimentarlo e controllarlo sono: due per l'alimentazione DC da collegare alla batteria della vettura nella reale applicazione oppure all'alimentatore durante la fase di test, ed un cavo formato da altri 12 cavi al suo interno che

rappresentano tutti i segnali che è possibile gestire con tale motore, sia segnali da dare come input e sia tutti quelli che riceviamo come output.

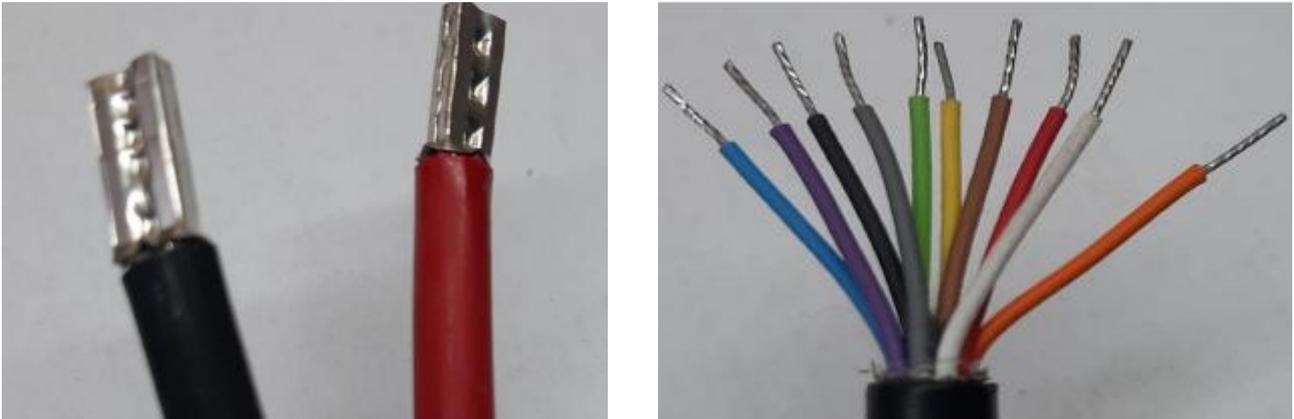


Figura 29. Cavi di alimentazione e dei segnali del motore.

In particolare la seguente tabella elenca tutte le tipologie di segnali e a quali cavi sono assegnati:

| Signal wire color | Name | Voltage level | Function | Type |
|-------------------|------------------|---|-------------------------------|--------------|
| red | +12 V | U=12 V, I<500 mA, max 16V, min.9V | MCU DC supply | Input |
| orange | Brake | 12V = brakes off; GND = brakes on | Brake signal input | Input |
| brown | HW Enable | 0V = disable; 12V = enable motor | Motor enable (disable) signal | Input |
| blue | CAN High | Standard voltage level | Communication | Standard |
| yellow | CAN Low | Standard voltage level | Communication | Standard |
| grey | MODE | 0V = mode change, 5-12V = no change | Mode change button | Input |
| violet | Throttle | 0V = no throttle, 5-12V = full throttle | Throttle analog input | Analog input |
| green | UART TX | 3,3 V TTL | Communication | Standard |
| white | UART RX | 3,3 V TTL | Communication | Standard |
| black | GND | GND | Signal ground | Input |

Tabella 1. Descrizione dei cavi di segnale di cui il motore è dotato.

La descrizione dettagliata dei segnali è la seguente:

- +12 V: cavo da collegare ad una alimentazione da 12 Volt per fornire energia al controller integrato del motore.
- Freno: segnale a cui fornire 0 V per attivare la rigenerazione, quindi attivare i freni e ignorare il segnale dell'acceleratore. Questo segnale viene utilizzato solo in modalità di controllo analogico.

- **Abilitazione HW:** questo segnale viene utilizzato per abilitare/disabilitare l'elettronica di potenza del motore. Dunque, per abilitarla, è necessario applicare +12 V a questo segnale anche dopo l'accensione dell'alimentazione di 12 Volt del controller del motore.
Se il segnale viene successivamente scollegato durante il funzionamento, il motore smette di fornire potenza in uscita ma è ancora accessibile tramite comunicazione CAN. Per riprendere il funzionamento completo, il motore deve essere ripristinato (spegnere e riaccendere l'alimentazione MCU +12V) e il segnale di abilitazione HW deve essere riapplicato.
- **CAN High, CAN Low:** utilizzato per la modalità di controllo CAN per la comunicazione con il motore (vedere la descrizione della comunicazione CAN nel capitolo 5).
Il segnale non deve essere collegato in modalità di controllo analogico ed il motore invierà comunque il messaggio CAN di stato ma non risponderà ad alcun messaggio di controllo CAN.
- **UART RX, UART TX:** i segnali sono riservati solo al debug del motore e non vengono utilizzati nelle applicazioni, dunque devono essere lasciati scollegati.
- **MODE:** questo ingresso è in genere collegato a un pulsante in modo che le modalità di azionamento del motore possano essere modificate premendo tale pulsante, in particolare viene collegato a GND per 50 ms per la modifica di una singola modalità o collegato a GND in modo continuo per modifiche di modalità sequenziali attraverso tutte le modalità disponibili. Anche questo segnale viene utilizzato solo in modalità di controllo analogico.
- **Acceleratore:** questo ingresso è in genere collegato a una manopola di controllo dell'acceleratore se viene utilizzata una modalità di controllo analogico. L'intervallo di tensione dell'ingresso di controllo analogico è 0-12 V oppure può essere regolato su 0-5 V.

A questo punto, una volta compresi tutte le tipologie di segnali da gestire e a quali circuiti fanno riferimento è stato necessario collegare i cavi di alimentazione per fornire alimentazione CC al motore ed al suo controllore ad un alimentatore rispettivamente da 48 Volt (tensione nominale del motore) e da 12 Volt, inoltre sono stati collegati i segnali necessari per controllare e far funzionare il motore. Il motore può essere controllato tramite segnali analogici (controllo analogico) oppure tramite comunicazione CAN (controllo CAN) e nella presente attività di tesi è stato conseguito un controllo CAN per simulare una reale comunicazione in vettura tra la centralina (VCU) e tutti i sistemi a bordo di un veicolo, compresi i motori.

Lo schema di collegamento che raffigura come è stato cablato il motore in fase di test è raffigurata dalla seguente figura:

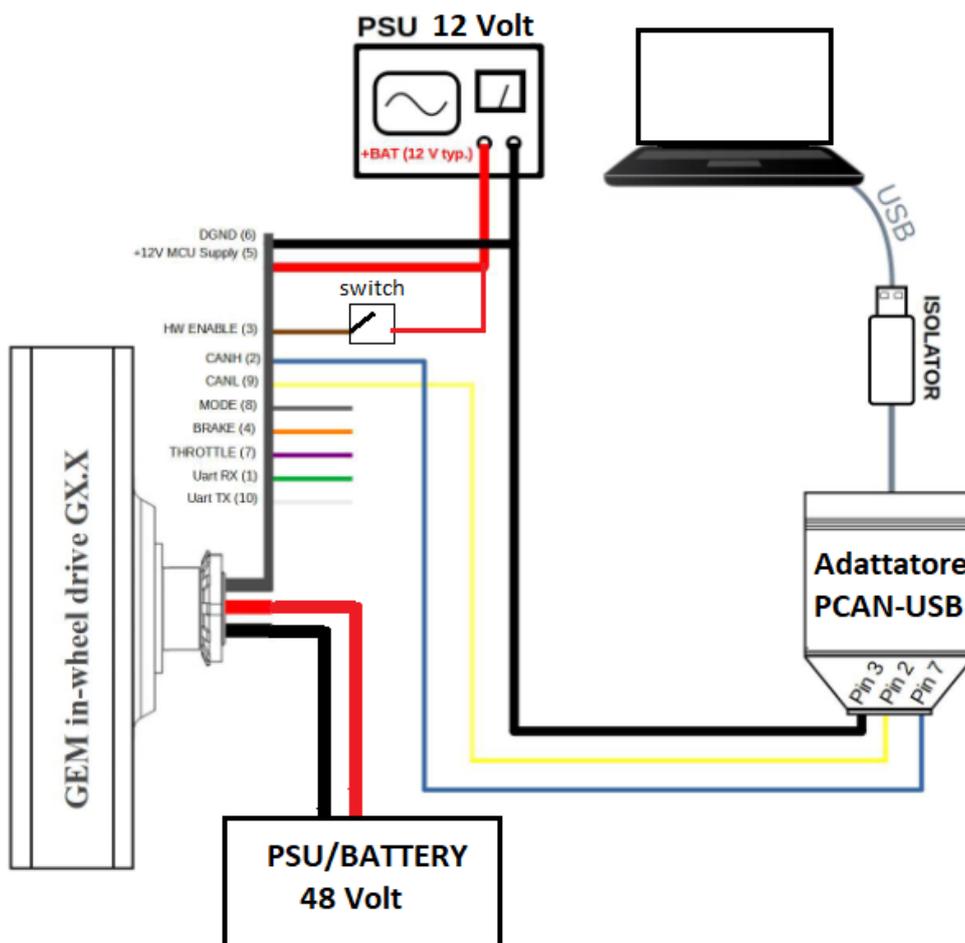


Figura 30. Schema cablaggio del motore nei test.

Come si può notare dallo schema i passaggi che sono stati compiuti per il collegamento del motore sono i seguenti:

- Sono stati collegati i cavi di alimentazioni in corrente continua del motore ad un alimentatore bidirezionale da 48 Volt, ovvero la tensione nominale del motore come descritto nella sua scheda tecnica.
- In seguito è stato collegato il cavo segnale marrone “HW ENABLE” tramite un interruttore manuale ad un secondo alimentatore di 12 Volt. Questo è necessario per fornire il segnale di accensione per l’elettronica di potenza del controller del motore agendo sull’interruttore, ed inoltre disabilitarla a seconda delle necessità.
- Inoltre è stato collegato il cavo di segnale rosso “+12Volt” e quello nero “GND” allo stesso alimentatore da 12 Volt utilizzato anche per dare il segnale di accensione al controller. Questa alimentazione è necessaria per il funzionamento del controller integrato del motore per poterlo quindi controllare regolandone la velocità e la coppia.

- Infine sono stati collegati i due cavi di segnale “CAN H” (blu) e “CAN L” (giallo) rispettivamente nei pin 7 e 2 di un connettore PCAN-USB di “Peack System” in modo da poter implementare una comunicazione CAN tramite un computer. Questi due segnali sono le due linee CAN caratteristiche per tale comunicazione dove avverrà il traffico di tutti i messaggi di stato e di controllo del motore durante il test ed il reale funzionamento del motore. Il connettore PCAN-USB rende possibile la connessione della linea CAN del motore con un computer in modo da poter gestire tutte le tipologie di messaggi della rete di comunicazione. In particolare è stato scelto questo strumento perché rende possibile la gestione del canale, ovvero la trasmissione e la ricezione dei messaggi, tramite Matlab. Infatti come sarà descritto in seguito è stato utilizzato proprio questo software per implementare la comunicazione con il motore e rendere possibile tutta la fase di testing.

Nella immagine sottostante è possibile visualizzare il reale collegamento appena descritto:

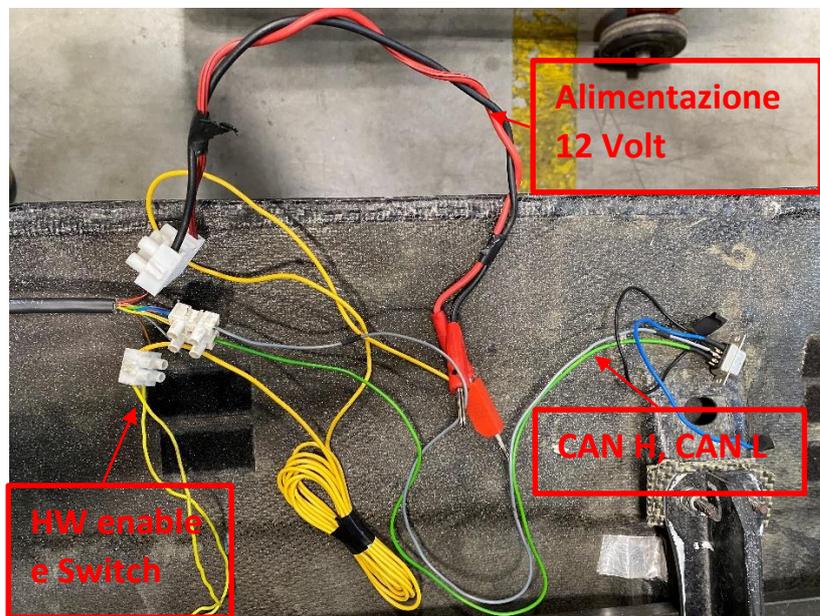


Figura 31. Cablaggio reale del motore.

Di seguito sono riportate delle immagini che rappresentano il setup utilizzato per il testing del motore in due configurazioni diverse:

1. Il primo test è stato fatto direttamente in vettura montando il motore nel suo reale posizionamento attaccato alla sospensione posteriore del veicolo. Questa prima configurazione è stata utilizzata a scopo puramente diagnostico al fine di verificare il corretto funzionamento del motore.



Figura 32. Prima configurazione per i test del motore

2. I successivi test sono stati fatti con l'apposito setup progettato per il testing dei motori. Ovvero è stato utilizzato un supporto dove montare il motore e la ruota del veicolo, inoltre è stata costruita una struttura sottostante con dei rulli per simulare l'interazione della ruota con l'asfalto. Questa configurazione è stata utilizzata per i reali test di caratterizzazione del motore.



Figura 33. Seconda configurazione per i test del motore.

6.3 Circuito di precarica

Nella applicazione reale in vettura lo schema per il cablaggio del motore è raffigurato nella figura sottostante:

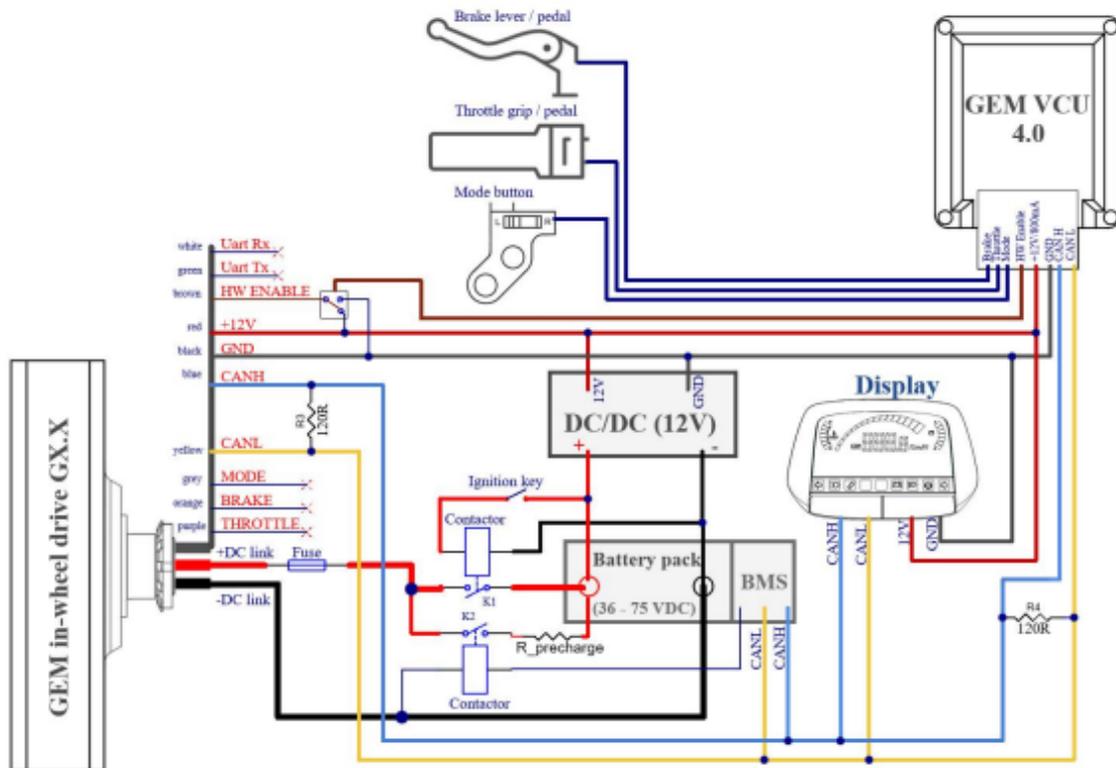


Figura 34. Schema cablaggio in una applicazione reale.

Si nota dalla figura che un elemento fondamentale per il corretto funzionamento del sistema è il circuito di precarica. Infatti gli inverter del motore e altri componenti collegati alla tensione del collegamento CC in un veicolo ibrido o elettrico in genere hanno condensatori di filtro di ingresso. I condensatori vengono utilizzati per limitare le cadute di tensione sui binari di alimentazione durante i carichi momentanei.

Quando una fonte di alimentazione CC viene applicata a un carico capacitivo, la risposta al gradino dell'ingresso di tensione causerà la carica del condensatore di ingresso. La carica del condensatore inizia con la corrente di spunto e termina con un decadimento esponenziale fino alla condizione di stato stazionario. La corrente assorbita da un condensatore può essere calcolata utilizzando la seguente equazione:

$$I_c = C * \frac{dV}{dt}$$

Dove:

- I_c : corrente che passa attraverso il condensatore
- C : capacità CC del sistema di batterie in Farad

- dV : variazione di tensione in Volt
- dt : variazione di tempo in secondi

Come si può vedere nell'equazione, la corrente di picco di spunto dipende dalla capacità C e dalla velocità di variazione della tensione (dV/dT). Il requisito funzionale del circuito di precarica ad alta tensione è di ridurre al minimo la corrente di picco in uscita dalla sorgente di alimentazione rallentando il dV/dT della tensione di alimentazione in ingresso. Al termine della sequenza di precarica, la resistenza di precarica viene commutata fuori dal circuito di alimentazione e torna a una sorgente di alimentazione a bassa impedenza per la modalità normale.

L'andamento della corrente durante questo transitorio è rappresentato nel grafico sottostante. La corrente inizialmente inizia con uno spunto e alla fine si riduce fino a una condizione di stato stazionario, come mostrato nella figura sottostante. Quando un contattore si chiude, il picco di corrente di spunto è estremamente rapido, in genere dura da 50 a 100 μs .

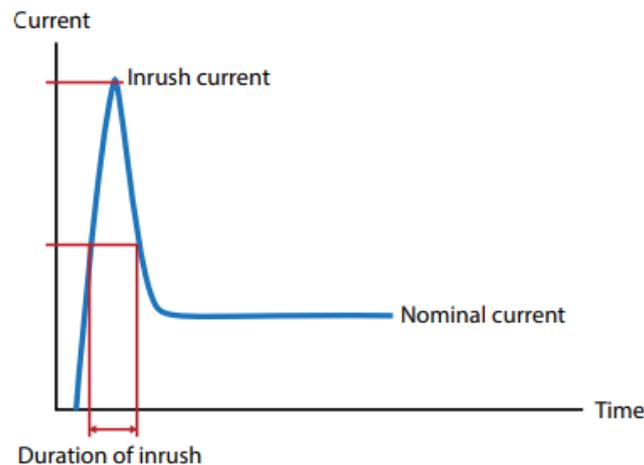


Figura 35. Andamento della corrente durante la carica di un condensatore [5].

L'obiettivo del circuito di precarica è quindi limitare la corrente di spunto all'accensione del sistema. A seconda della tensione di sistema, del valore di capacità e del design previsto, la precarica può richiedere da pochi millisecondi a diversi secondi. In generale, maggiore è la tensione di sistema e maggiore è la capacità, più lungo sarà il tempo di precarica. Poiché la tensione di sistema è fissata dalla batteria e la capacità di sistema è fissata dall'inverter del motore e da altri componenti collegati, l'unico parametro rimanente con cui lavorare è il tempo.

6.3.1 Struttura circuito di precarica

Nel sistema di batterie di trazione di un veicolo elettrico ci sono in genere due contattori principali per fornire un doppio isolamento della tensione della batteria quando il sistema è spento:

- Contattore positivo principale
- Contattore negativo principale

Il circuito di precarica solitamente è costituito da un contattore separato, più piccolo, collegato in serie con una resistenza. Questi due componenti sono quindi cablati in parallelo attraverso il

contattore principale (figura 36). Il circuito di precarica si trova comunemente sulla gamba positiva, ma potrebbe essere installato altrettanto facilmente sulla gamba negativa.

La sequenza di eventi per la precarica di un sistema è in genere composta dai seguenti passaggi:

1. Chiudere il contattore negativo principale
2. Chiudere il contattore di precarica
3. Monitorare la tensione per assicurarsi che aumenti come previsto
4. Quando la tensione si è equalizzata (dopo 5 Tau), chiudere il contattore positivo principale
5. Aprire il contattore di precarica
6. Accendere il componente principale del sistema

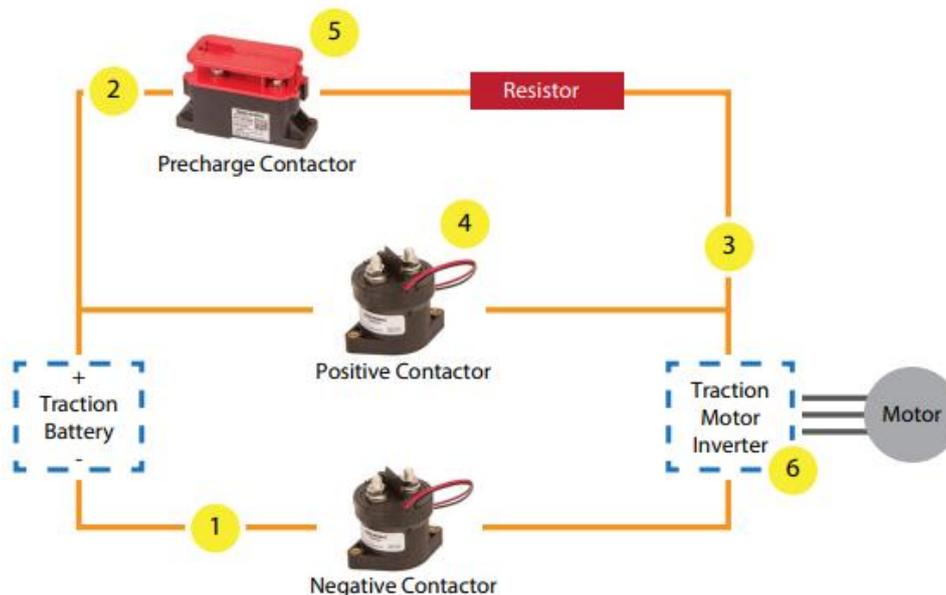


Figura 36. Schema elettrico del circuito di precarica [5].

6.3.2 Scelta del contattore

Poiché il circuito di precarica è collegato direttamente alla batteria, sia il contattore che la resistenza devono essere classificati per la piena tensione della batteria. Il contattore e la resistenza di precarica devono anche essere in grado di gestire la corrente di precarica e la dissipazione di potenza.

Per la scelta del contattore occorre tenere a mente le seguenti considerazioni:

- La corrente nominale continua del contattore di precarica non è così critica poiché il tempo richiesto per trasportare la corrente di precarica è breve, solitamente solo pochi secondi.
- Anche la capacità del contattore di precarica di interrompersi sotto carico non è così critica poiché non interromperà alcun flusso di corrente durante il normale funzionamento. Tuttavia, deve essere in grado di effettuare sotto carico migliaia di volte durante la vita del veicolo, poiché ciò accade ogni volta che si verifica la precarica.
- La capacità di corrente di picco del contattore di precarica è importante e dovrebbe essere indicata nella scheda tecnica.

6.3.3 Il circuito RC

Quando un resistore è collegato in serie con un condensatore, forma un semplice circuito RC. Quando viene applicata tensione, il condensatore si caricherà gradualmente attraverso il resistore fino a quando la tensione non si equalizzerà.

- La corrente di precarica scenderà a $1/e$ (36,7%) del suo valore iniziale dopo una sola costante di tempo, nota anche come una Tau, o $1T$.
- Allo stesso modo, la tensione di precarica attraverso il condensatore salirà al 63,2% della tensione di alimentazione dopo $1T$. La Tau può essere trovata utilizzando:

$$Tau = R \times C$$

Sono necessarie cinque costanti di tempo ($5T$) per caricare completamente un condensatore. Poiché la curva di carica per un circuito RC è esponenziale, il condensatore non diventa mai realmente "completamente" carico al 100%. Per questo motivo, cinque costanti di tempo ($5T$) sono considerate la migliore prassi nella progettazione di circuiti, che si traduce in una carica completa del 99,33%. La tensione attraverso il condensatore in qualsiasi momento durante il periodo di precarica si trova utilizzando la seguente formula:

$$V_c(t) = V_s \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right)$$

- V_c = Tensione del capacitore [V]
- V_s = Tensione della batteria [V]
- t = tempo [s]
- RC = costante di tempo del circuito [ΩF]
- $e = 2,71828$

Dopo quattro costanti di tempo ($4T$), un condensatore è quasi completamente carico e la tensione ai suoi capi sarà circa il 98% della tensione di alimentazione della batteria. Il periodo di tempo, da $0T$ a $4T$, è noto come periodo transitorio. Il tempo dopo $4T$ è chiamato periodo di stato stazionario.

Allo stesso modo, la corrente che scorre nel condensatore in un dato momento durante il periodo di precarica può essere trovata utilizzando:

$$I(t) = \frac{V_s - V_c(t)}{R}$$

Il grafico in Figura 37 mostra la tensione di precarica, la corrente e gli altri punti di interesse correlati descritti sopra per un semplice circuito RC. Questo grafico dimostra perché $5T$ è considerato la migliore prassi per la quantità di tempo richiesta per precaricare un condensatore.

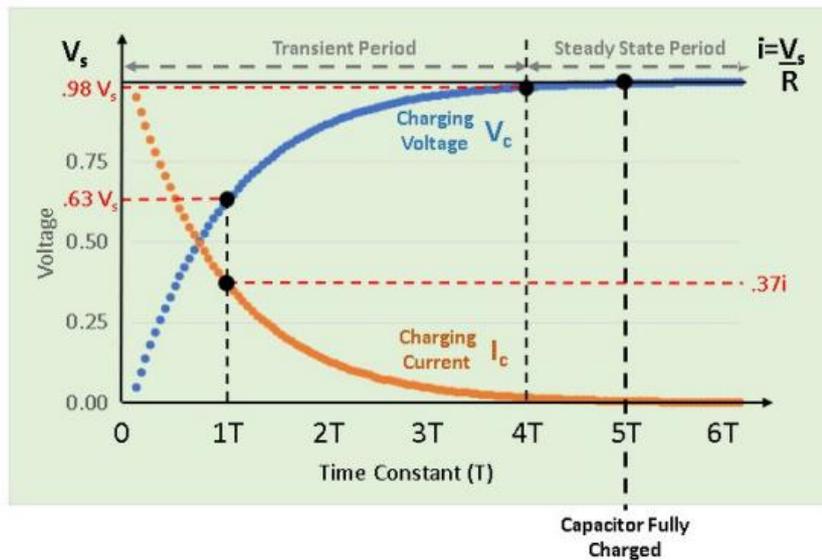


Figura 37. Esempio andamento tensione e corrente in un circuito RC [5].

6.3.4 Scelta di un resistore

Solitamente i tempi di carica consentono un ritardo fino a circa 400 ms nelle reali applicazioni. I calcoli seguenti mostrano dunque come scegliere il resistore adatto e la potenza di picco e media da considerare durante il suo dimensionamento per il valore di capacità proveniente dalla scheda tecnica del motore di 1,1 mF.

$$R = \frac{t_{precarica} [s]}{5 \times C [mF]} = \frac{400 \text{ ms}}{5 \times 1,1 \text{ mF}} = 72 \Omega$$

Nell'equazione si assume un fattore di 5 costanti di tempo (5τ) per il tempo di carica che prevede che la tensione sul condensatore sia il 99% della tensione di ingresso.

La resistenza di precarica deve essere dimensionata per gestire la potenza che verrà dissipata durante la precarica. Si noti che la potenza dissipata dalla resistenza di precarica non è costante e non è lineare durante la precarica. Questo si trova utilizzando

$$P(t) = I(t)^2 \times R$$

- P = Potenza dissipata sul resistore [W]
- I = Corrente che attraversa il resistore [A]
- R = Resistenza del resistore [Ω]

La potenza di picco istantanea si verifica proprio all'inizio della precarica, quando la corrente è più alta. Questo può essere calcolato prendendo $(I^2) \times R$ a $t=0$, momento in cui la corrente è semplicemente la tensione della batteria divisa per la resistenza di precarica. Questa potenza di picco dura solo per un periodo di tempo molto breve e viene calcolata con la seguente formula.

$$P_{MAX} = \frac{V^2}{R} = \frac{(48 \text{ V})^2}{72 \Omega} = 32 \text{ W}$$

Dopo questa potenza di picco iniziale, la resistenza di precarica continuerà a dissipare energia fino al termine della precarica. Se il tempo di precarica è sufficientemente lungo (>3 costanti di tempo),

il resistore dissiperà la stessa quantità di energia dell'energia totale immagazzinata nei condensatori di ingresso completamente carichi secondo la seguente formula:

$$E = \frac{C \times V^2}{2}$$

- E = Energia [J]
- C = Capacità del motore [F]
- V = Tensione batteria [V]

Quando si seleziona una resistenza, potrebbe essere sufficiente trattare la potenza media per l'intera durata della precarica come una potenza di picco la cui durata è il tempo di precarica. Questo può essere trovato semplicemente dividendo l'energia totale dissipata dalla resistenza per il tempo di precarica totale.

$$P = \frac{E}{T} = \frac{C \times V^2}{2 \times t} = \frac{1,1 \text{ mF} \times (48 \text{ V})^2}{2 \times 400 \text{ ms}} = 3,2 \text{ W}$$

- P = Potenza [W]
- E = Energia [J]
- T = Tempo [s]

A causa dell'aumento di potenza durante la precarica, la resistenza di precarica deve essere robusta nella progettazione e classificata per alta potenza. Poiché la durata della precarica è relativamente breve, non è necessario specificare una resistenza che possa gestire tutta questa potenza su base continua. Infatti, alcuni produttori specificheranno la dissipazione di potenza di picco.

In sintesi, nel caso in esame la resistenza da scegliere deve essere selezionata in modo che il suo valore di resistenza sia almeno di 72 Ω , per mantenere un margine di sicurezza, e la sua potenza nominali sia sufficienti per gestire la potenza media e di picco del circuito indicate.

6.4 Setup utilizzato per i test

I principali obiettivi a cui si è mirato durante la progettazione della configurazione di testing del motore sono innanzitutto la fedeltà che il test deve avere per replicare in maniera più simile possibile il reale funzionamento del motore in vettura. Inoltre il secondo parametri è la sicurezza, visto che i test servono per la caratterizzazione del motore, non sapendo quindi ancora il suo reale comportamento, è necessario configurare un setup in modo da evitare eventuali danneggiamenti dei componenti utilizzati a causa di funzionamenti anomali o per esempio picchi di richieste energetiche dannose per l'alimentazione. Infine ultima caratteristica importante è la versatilità, ovvero la possibilità di poter attuare varie tipologie di test in varie configurazioni senza doversi limitare alla ad una configurazione specifica; questo rende anche possibile l'utilizzo del setup progettato nel futuro con altre tipologie di motori senza finalizzarlo solamente al singolo caso specifico.

Dunque la configurazione scelta per eseguire i test del motore è composta dai seguenti componenti:

- Supporto progettato appositamente per poter sostenere il motore durante i test ed inoltre poter simulare l'interazione della ruota con il terreno. Per tale compito sono stati utilizzati

dei rulli in modo che la ruota potesse ruotare non rimanendo sospesa ma agendo sui rulli e dunque simulando la sua reale interazione con l'asfalto come nella reale applicazione in vettura. Inoltre il supporto è dotato anche di un sistema di regolazione dell'altezza dei rulli in modo da fornire versatilità alla struttura.



Figura 38. Supporto progettato.

- Alimentatore bidirezionale da 18 kW e con 75 Ampere massimi di corrente erogabile per fornire energia al motore invece di utilizzare la batteria come nell'applicazione reale. Questo permette di poter fare i test con un'alimentazione totalmente controllabile, infatti, l'alimentatore può essere settato con il giusto voltaggio e permette di impostare i limiti di corrente da erogare in modo da evitare eventuali picchi o sovraccarichi che possono essere richiesti in certe configurazioni in cui il motore può essere portato a lavorare. Avendo l'attività di test lo scopo di caratterizzare il motore, questo aspetto è di particolare importanza per la sicurezza delle prove e per non danneggiare i componenti. Inoltre l'alimentatore possiede la capacità sia di erogare che di assorbire energia elettrica, ovvero permette di far funzionare la macchina sia come motore e sia come generatore, potendo eventualmente simulare le frenate rigenerative dove l'energia meccanica di rotazione viene convertita in energia elettrica per ricaricare la batteria nella reale applicazione in vettura.



Figura 39. Alimentatore bidirezionale per l'alimentazione di 48 Volt.

- Alimentatore da 12 Volt per il controllore del motore integrato in esso. In particolare, come descritto nella sezione del cablaggio, per questa linea di alimentazione è stato inserito un interruttore manuale per aprire e chiudere il circuito per accendere o spegnere il motore in maniera controllata.



Figura 40. Alimentatore da 12 Volt.

6.5 Supporto per il test del motore

Tra le due tipologie di modalità di test indicate precedentemente quella che è stata scelta per motivi di praticità ed efficacia è la seconda, ovvero quella sul supporto. Dunque è stato necessario progettare e costruire tale struttura in modo da poterla rendere compatibile con il motore e soddisfare i seguenti requisiti:

- Deve poter sostenere il motore montato all'interno della ruota
- Deve fornire un appoggio alla ruota per simulare una reale condizione di contatto con il terreno
- Deve poter essere versatile per poter testare in futuro altre tipologie di motori

Per realizzare una struttura che potesse soddisfare tutti i requisiti si è pensato ad un supporto in acciaio su cui fissare il motore tramite la stessa flangia che verrà utilizzata anche nel montaggio alla sospensione in vettura, e sotto di essa dei rulli per simulare il contatto tra ruota e terreno che fungono anche da supporto senza i quali il motore lavorerebbe a sbalzo. Inoltre, per poter aggiustare l'altezza dei rulli rispetto alla ruota, in modo da rendere la struttura versatile e quindi utilizzabile con diverse configurazioni, questi sono stati fissati ad un pannello di legno tramite un sistema di viti a doppio dado. Ovvero, ponendo la struttura dei rulli tra due dadi posti sulla stessa vite fissata al pannello, è possibile regolarne l'altezza svitando o avvitando quest'ultimi facendoli quindi scorrere sulle viti alzandoli o abbassandoli. Grazie a questa soluzione, quindi, è possibile testare il motore facendo ruotare la ruota grazie alla sua interazione con i rulli e potendolo supportare simulando l'azione del terreno.

Nelle seguenti immagini sono riportati i disegni CAD che rappresentano la struttura così progettata:

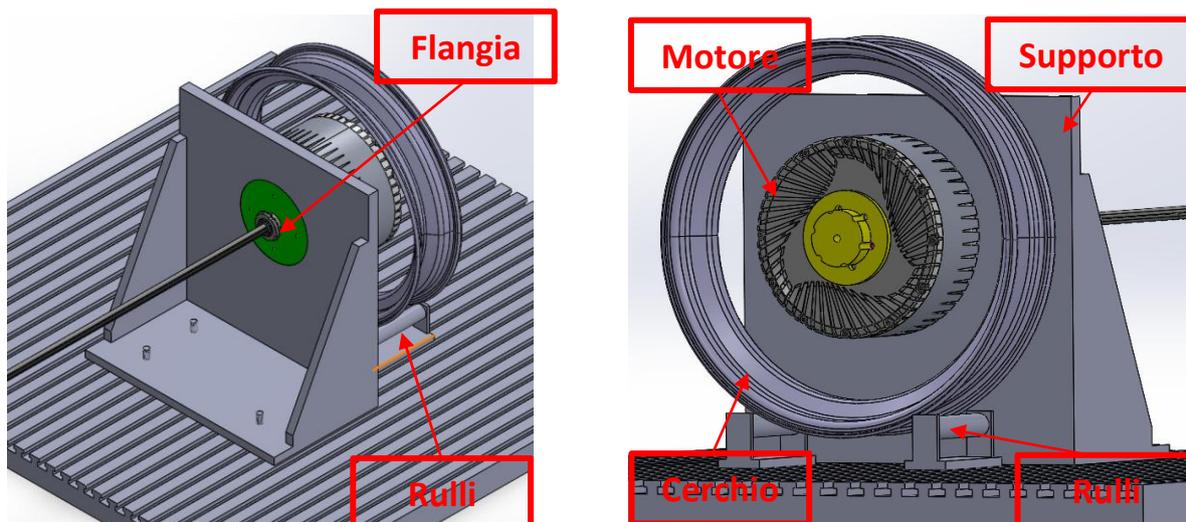


Figura 41. CAD della configurazione di testing.

Per realizzare questa struttura quindi sono stati seguiti i seguenti passaggi:

- Fissaggio del supporto sul banco tramite viti.



Figura 42. Fissaggio supporto.

- Fissaggio del pannello di legno sul banco davanti al supporto appena montato.



Figura 43. Fissaggio pannello per i rulli.

- Montaggio dei rulli sul pannello di legno tramite la modalità descritta in precedenza utilizzando viti con doppio dado per la regolazione dell'altezza.

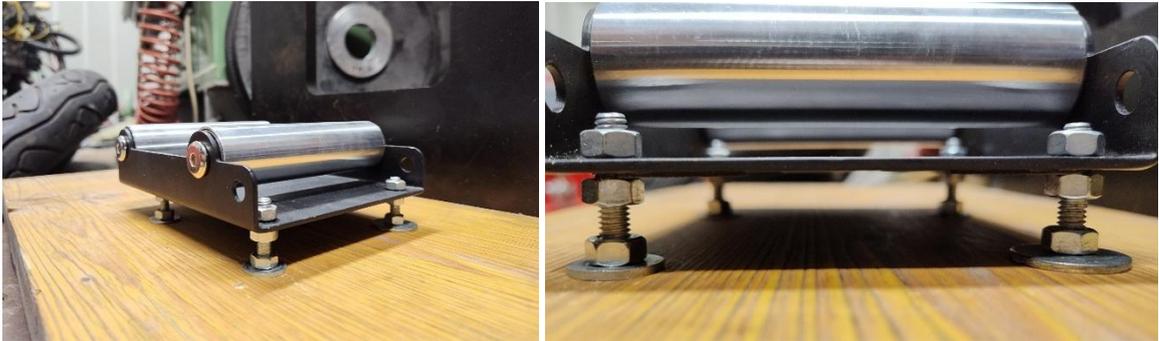


Figura 44. Montaggio dei rulli sul pannello tramite sistema a viti con doppio dado.

- Montaggio del motore e ruota al supporto in acciaio tramite la stessa flangia che permette l'assemblaggio anche alla sospensione della vettura



Figura 45. Montaggio motore e ruota al supporto.

Una volta assemblati tutti i componenti del setup è possibile iniziare i test per la caratterizzazione del motore, attività che verrà descritta nei capitoli successivi.

CAPITOLO 7: COMUNICAZIONE CAN CON IL MOTORE

Per poter comunicare con il motore tramite un controllo CAN prima è necessario comprendere la struttura dei messaggi che esso è in grado di ricevere e trasmettere. Queste informazioni sono indicate in generale nel manuale del motore e più nello specifico nel database del motore fornito dai produttori "Gem Motors". Infatti nel Database fornito viene esplicitata la struttura dei messaggi che il motore è in grado di gestire, quindi come costruire i messaggi e come tradurli per estrapolare da essi le grandezze fisiche contenuti.

Nella seguente sezione verranno spiegate le varie tipologie di messaggi che il motore è capace di gestire e i segnali contenuti in essi.

7.1 Struttura messaggio di controllo

I messaggi di controllo che il motore è in grado di ricevere e interpretare, e quindi che è necessario costruire per poterlo controllare, sono indicati nella parte di database riportata di seguito.

```
BO_ 18 Control: 3 Vector__XXX
SG_ Control_value_in : 0|16@1- (1,0) [-10000|10000] "" Vector__XXX
SG_ Control_mode_in : 16|2@1+ (1,0) [0|2] "" Vector__XXX
SG_ Motor_mode_in : 18|3@1+ (1,0) [0|2] "" Vector__XXX
SG_ SW_enable_in : 21|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector__XXX
SG_ Reserved : 22|1@1+ (1,0) [0|0] "" Vector__XXX
SG_ Debug : 23|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector__XXX
```

Figura 46. Struttura messaggi di controllo.

Come si nota innanzitutto l'ID del messaggio che deve contenere i valori di controllo deve avere il valore 18, quindi è un messaggio con alta priorità nel canale, e questo contiene 6 diversi segnali:

- Segnale che indica la velocità di controllo da fornire come input al motore, in particolare il valore deve essere in rpm con un fattore moltiplicativo di valore 10.
- Segnale che indica la modalità di controllo da conseguire, con la possibilità di applicare un controllo di velocità oppure un controllo in coppia del motore.
- Segnale che identifica la modalità di operatività del motore tra tre diverse disponibili: normale, boost, riserva.
- Segnale che abilita o disattiva il Software del controller del motore, e quindi che abilita il controllore integrato.
- Un segnale riservato e non modificabile di valore nullo.
- Un segnale per attivare una modalità di debug, ovvero per iniziare a ricevere dal motore più messaggi con più informazioni su diverse grandezze che è in grado di fornire.

7.2 Struttura dei messaggi di stato del motore

I messaggi di feedback dove sono contenute tutte le grandezze fisiche che il motore è in grado di fornire, in base ai sensori di cui è dotato, e che quindi devono essere ricevuti e tradotti per ottenere un risultato dai test che verranno conseguiti sono indicati nella sezione di database riportata di seguito.

```

BO_100 Status_0: 8 Vector_XXX
SG_Control_value : 0|16@1- (1,0) [-10000|10000] "" Vector_XXX
SG_Control_mode : 16|2@1+ (1,0) [0|2] "" Vector_XXX
SG_Motor_mode : 18|3@1+ (1,0) [0|7] "" Vector_XXX
SG_SW_enable : 21|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_Motor_state : 22|2@1+ (1,0) [0|3] "" Vector_XXX
SG_Motor_torque : 24|16@1- (1,0) [-1000|1000] "Nm" Vector_XXX
SG_Motor_RPM : 40|16@1- (0.1,0) [-1000|1000] "RPM" Vector_XXX
SG_Motor_temp : 56|8@1- (1,0) [-127|127] "degC" Vector_XXX

```

Figura 47. Struttura messaggi di stato del motore.

Innanzitutto l'ID dei messaggi di stato forniti dal motore hanno valore 100 e contengono i seguenti segnali:

- Velocità di controllo ricevuta in rpm moltiplicata per un fattore di valore 10.
- Modalità di controllo del motore, tramite velocità oppure coppia.
- Modalità di lavoro del motore che dovrà essere analoga a quella indicata anche nei messaggi di controllo.
- Stato di attivazione del Software, ovvero del controllore integrato del motore.
- Stato del motore, ovvero un segnale che indica se il motore sta funzionando correttamente oppure in errore.
- Coppia prodotta in Nm.
- Velocità reale del motore in rpm.
- Temperatura del motore durante il suo funzionamento.

Dunque si nota come da questo messaggio di stato è possibile estrapolare tutte le grandezze fisiche di interesse che sono necessarie come risultati dei test per comprendere le prestazioni e il comportamento del motore.

7.3 Messaggi di errore

Il motore in dotazione è in grado di fornire oltre che messaggi di stato anche i messaggi di errore, ovvero dove sono indicati, se presenti, le problematiche che si verificano durante una prova che ne compromettono il corretto funzionamento. Questa informazione nel feedback è di cruciale importanza per comprendere i problemi che possono verificarsi per poterli poi correggere. La seguente tabella elenca tutti i possibili errori che possono verificarsi durante la comunicazione indicati dal manuale del motore.

| Error code | Description |
|-------------------|--|
| 0 | Initialization error (FW and FWset version mismatch) |
| 1 | FW Settings file not found |
| 2 | Motor stalled |
| 3 | Controller data reading timeout |
| 4 | Invalid hall sensor sequence |
| 5 | Invalid hall sector |
| 6 | Error reading temperature sensor |
| 7 | Position sensor reading error |
| 8 | Error reading encoder |
| 9 | Zero position offset not set |
| 10 | HW enable not set |
| 11 | Inverter 1 temperature too high |
| 12 | Inverter 2 temperature too high |
| 13 | Inverter 3 temperature too high |
| 14 | Inverter 4 temperature too high |
| 15 | Inverter 5 temperature too high |
| 16 | Inverter 6 temperature too high |
| 17 | CPU temperature too high |
| 18 | Hall temperature too high |
| 19 | DCLink temperature too high |
| 20 | Error in DCLink communication |
| 21 | Inverter 1 overcurrent |
| 22 | Inverter 2 overcurrent |
| 23 | Inverter 3 overcurrent |
| 24 | Inverter 4 overcurrent |
| 25 | Inverter 5 overcurrent |
| 26 | Inverter 6 overcurrent |
| 27 | DC overvoltage |
| 28 | DC undervoltage |
| 29 | Double CAN id on the bus |
| 30 | CAN communication timeout (after 200ms) |
| 31 | Inverter 1 fault |
| 32 | Inverter 2 fault |
| 33 | Inverter 3 fault |
| 34 | Inverter 4 fault |
| 35 | Inverter 5 fault |
| 36 | Inverter 6 fault |
| 37 | CAN send error |
| 38 | Lost frames on CAN bus |
| 39 | Overspeed error |
| 40 | CPU overloaded |

Tabella 2. Lista errori nella comunicazione CAN con il motore.

Inoltre viene fornita anche la sezione del database dove viene indicata la struttura di questi messaggi in modo da poter capire come poter estrapolare le informazioni di interesse.

```

BO_ 103 Error: 8 Vector_XXX
SG_ E_INIT_ERROR : 0|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_INVALID_SETTINGS : 1|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_MOTOR_STALLED : 2|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_READING_TIMEOUT : 3|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_HALL_SEQUENCE : 4|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_HALL_SECTOR : 5|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_TEMP_SENSOR : 6|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_POSENSOR : 7|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_ENCODER : 8|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_ZERO_POSITION : 9|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_HW_ENABLE : 10|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_INV01_TEMP : 11|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_INV02_TEMP : 12|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_INV03_TEMP : 13|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_INV04_TEMP : 14|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_INV05_TEMP : 15|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_INV06_TEMP : 16|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_CPU_TEMP : 17|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_WINDING_TEMP : 18|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_DCLINK_TEMP : 19|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_DCLINK_COMM : 20|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX

SG_ E_INV01_OVERCURRENT : 21|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_INV02_OVERCURRENT : 22|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_INV03_OVERCURRENT : 23|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_INV04_OVERCURRENT : 24|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_INV05_OVERCURRENT : 25|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_INV06_OVERCURRENT : 26|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_OVERVOLTAGE : 27|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_UNDERVOLTAGE : 28|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_CAN_SAME_ID : 29|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_CAN_TIMEOUT : 30|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_INV01_FAULT : 31|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_INV02_FAULT : 32|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_INV03_FAULT : 33|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_INV04_FAULT : 34|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_INV05_FAULT : 35|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_INV06_FAULT : 36|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_CAN_SEND_ERR : 37|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_CAN_OVERFLOW : 38|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_MOTOR_OVERSPEED : 39|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX
SG_ E_CPU_FAULT : 40|1@1+ (1,0) [0|1] "" Vector_XXX

```

Figura 48. Struttura messaggi di errore del motore.

Come si può notare il valore dell'ID di questo messaggio è 103 ed inoltre ad ogni segnale è assegnato il valore 1 se si verifica l'errore indicato oppure 0 se non si verifica.

CAPITOLO 8: TESTING DEL MOTORE UTILIZZANDO “FLASH TOOL”

“Flash Tool” è il programma fornito dai produttori del motore dedicato al controllo CAN. Questo tool è stato utilizzato per eseguire i primi test al motore in modo da verificarne il corretto funzionamento ma non per i reali test per la caratterizzazione del motore a causa dei limiti che il programma impone. Infatti, nonostante sia possibile controllare il motore dandogli in input i valori di velocità di controllo e visualizzare come feedback a schermo i valori delle grandezze fornite in uscita dal motore come velocità, coppia e potenza, il tool non è capace di salvare i dati e poterli graficare. Questo grande limite, quindi, ha portato alla necessità di sviluppo di una ulteriore interfaccia per rendere l’attività di testing il più completa possibile e poter conseguire un vero e proprio studio del comportamento del motore.

8.1 Interfaccia Flash Tool

L’interfaccia principale del software fornito dai produttori del motore è la seguente:

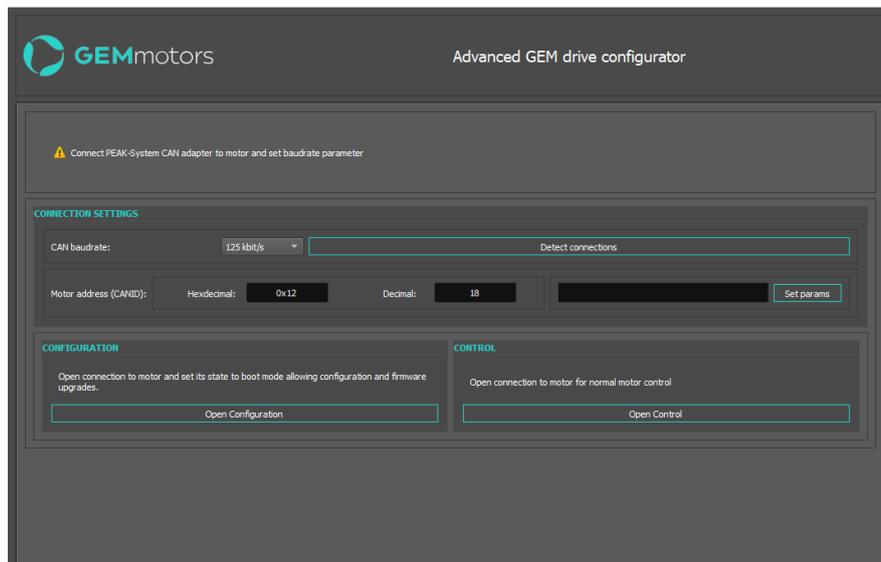


Figura 49. Schermata principale del Flash Tool.

Dalla finestra principale è possibile impostare le caratteristiche della comunicazione CAN che si vuole implementare per controllare il motore. Ovvero è necessario impostare:

- La velocità di trasmissione dei messaggi all’interno del canale CAN impostando il giusto valore del baudrate. Questo valore è impostato a 125 kbit/s come suggerito dal manuale del motore.
- Il valore di identificazione dei messaggi CAN che si vuole controllare durante la comunicazione in esadecimale e decimale. Il valore da impostare è quello corrispondente ai messaggi di controllo e dunque il valore 18.

A questo punto per iniziare le prove con il motore è necessario premere il tasto “Open Control” della pagina iniziale e si aprirà la seguente interfaccia:

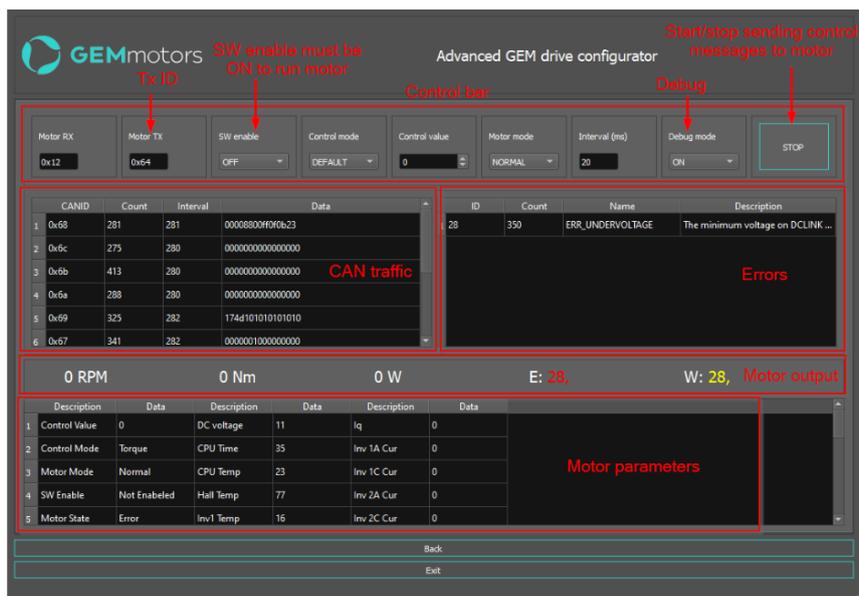


Figura 50. Schermata di controllo del Flash Tool.

L'interfaccia di controllo è composta dalle seguenti sezioni in ordine di livelli:

- Sezione superiore dove impostare tutti i valori di controllo del motore. Ovvero, partendo da sinistra, è possibile attivare il controllore del motore, impostare la modalità di controllo che si vuole conseguire (coppia o velocità), il valore della velocità di controllo in rpm da imporre al motore, la modalità di operatività del motore (normale, boost, rigenerativa), impostare il periodo di trasmissione dei messaggi di controllo ed infine iniziare o interrompere la prova tramite l'apposito pulsante.
- Sezione dove a sinistra visualizzare il traffico dei messaggi nel canale con le loro caratteristiche di ID e contenuto scritto in esadecimale, ed invece a destra visualizzare i messaggi di errore se sussistono.
- Sezione dove visualizzare i principali feedback che il motore è capace di fornire, ovvero la velocità in rpm, la coppia in Nm, la potenza sviluppata in W ed infine i codici di errore e warning durante il test.
- Ultima sezione dove poter visualizzare tutti i parametri che il motore è in grado di fornire durante il suo funzionamento.

Si può concludere quindi che il software fornito non risulta essere adatto per l'attività di testing del motore perché è in grado solo di stampare a schermo i feedback del motore senza fornire la possibilità di salvarli o graficarli per poi poterli studiare. Nonostante ciò, il tool ha trovato la sua utilità in fase diagnostica del motore, infatti è stato utilizzato come strumento rapido e pronto all'uso per attuare la prima verifica sul motore in modo da verificarne il corretto funzionamento e la corretta comunicazione tramite CAN. Quindi sono state conseguite varie prove con entrambi i motori che sono destinati alla trazione del veicolo imponendogli vari valori di velocità e verificando a schermo il corretto raggiungimento di esse. Queste prove hanno permesso di verificare il corretto comportamento del motore e della comunicazione con esso.

CAPITOLO 9: CODICE MATLAB PER IL CONTROLLO DEL MOTORE

Una volta verificato il corretto funzionamento dei motori con i primi test puramente diagnostici si è passati a test di caratterizzazione del motore. Questo scopo ha reso necessaria l'implementazione di una comunicazione CAN con il motore in modo da poterlo controllare facendogli percorrere diversi profili di velocità e simultaneamente poter ricevere come feedback tutte le grandezze fisiche e informazioni che è in grado di fornire in modo da poter studiare il suo funzionamento nella sua completezza.

Nel seguente capitolo verrà spiegato nel dettaglio il codice Matlab progettato per instaurare una comunicazione CAN con il motore, seguendo la logica illustrata precedentemente nelle figure 28 e 29, in modo da controllare il motore. Dunque, con il codice così creato sarà possibile inviare messaggi di controllo al motore e successivamente ricevere quelli di feedback in modo da monitorare tutti i parametri resi disponibili dal motore ed in seguito poterli studiare per conseguire alla sua caratterizzazione.

9.1 Creare il canale di comunicazione CAN per controllare il motore.

Per prima cosa è stato creato un canale di comunicazione CAN dove avverrà l'intero traffico di messaggi di controllo e ricezione, questo è reso possibile grazie alla possibilità fornita da Matlab di aprire tale canale con un dispositivo PCAN-USB di "Peak System", ovvero un adattatore DB9-USB dotato di transistor, utilizzato per collegare il motore al pc. In seguito è stato configurato il canale così creato con un "bus speed", dato che indica la velocità di trasmissione dei messaggi sulla linea CAN, di 125kbit/s come consigliato dal manuale del motore ed inoltre è stato associato il database al canale al fine di riuscire a convertire tutti i messaggi presenti in esso da un formato binario ad un formato decimale con i corretti valori fisici. Di seguito sono riportati tutti i passaggi e le funzioni utilizzate in sequenza per rendere possibile questa prima operazione appena descritta:

- Caricare il Database per la traduzione dei messaggi can trasmessi/ricevuti in parametri fisici.
- Creare il canale can per comunicare con il motore attraverso il sistema PCAN-USB di Peak-System
- Configurare il corretto baud rate del canale, ovvero la giusta velocità di trasmissione dati.
- Associare il Database al canale appena creato.

9.2 Creare il messaggio di controllo e avviare il canale.

A questo punto è stato inizializzato un messaggio CAN di controllo che verrà inviato al motore durante la reale trasmissione nei test seguendo le indicazioni fornite dal manuale del motore per il settaggio dei vari segnali contenuti; questo messaggio è stato settato in modo da impostare i giusti parametri per controllare il motore in velocità. Il messaggio è stato creato sulla base della struttura indicata dal database, ovvero contenente al suo interno tutti i segnali necessari per controllare il motore, e questi sono stati impostati in base alle indicazioni fornite dal manuale. In particolare i segnali presenti nel messaggio di controllo sono i seguenti:

- Valore di controllo della velocità in rpm moltiplicata per 10.
- Modalità di controllo del motore ponendo il valore 0 per conseguire un controllo in coppia ed invece 1 per un controllo in velocità.
- Modalità di funzionamento del motore tra normale (0), boost (1), inversa (2), rigenerativa (3) oppure personalizzata (4 – 7).
- Comando per accendere il controllore del motore (“Software enable”) ponendo come valore 1, oppure 0 per spegnerlo.
- Altri segnali riservati e non modificabili.

Oltre alla definizione del messaggio è stato impostata la trasmissione periodica del messaggio nel canale indicando quindi con quale frequenza il messaggio deve essere trasmesso una volta fatta partire la comunicazione. Il periodo di trasmissione impostato è di 10 ms come indicato dal manuale.

Infine, finito di impostare tutto il necessario per la comunicazione è possibile avviare il canale di comunicazione con l’apposito comando, e allo stesso tempo, quindi, inizia anche la trasmissione dei messaggi di controllo.

Dunque, i passaggi seguiti in questa sezione di codice per creare il messaggio CAN e impostare i giusti valori dei segnali in esso contenuti sono i seguenti:

- Creare il messaggio CAN di controllo sulla base della struttura indicata dal Database.
- Assegnare i corretti valori ai segnali contenuti nel messaggio per accendere il controllore e conseguire test controllando la velocità in modalità normale di operatività del motore.
- Impostare la trasmissione periodica automatica del messaggio ogni 10 ms, valore indicato dal manuale del motore in un controllo CAN.
- Avviare il canale di comunicazione facendo partire quindi la trasmissione dei messaggi.

9.3 Avviare il motore

Per avviare il motore è necessario assegnare al segnale “Software enable” il valore 1 in modo da fornire il segnale di accensione al controller integrato del motore una volta alimentato con una tensione di 12 Volt. Per fornire tale alimentazione, una volta effettuato tutto il cablaggio descritto nel capitolo precedente, è necessario impostare lo switch manuale sulla posizione di accensione in modo tale da chiudere il circuito ed iniziare quindi a fornire anche la seconda alimentazione da 12 Volt per il controller.

9.4 Definizione del profilo di velocità e trasmissione

Come metodo per controllare il motore durante il test è stato realizzato un ciclo “for” in modo da poter modificare il valore del segnale di controllo della velocità in base alla struttura del test che si vuole eseguire. Quindi mantenere una certa velocità di controllo per un certo periodo di tempo grazie all’utilizzo di una pausa nello script, ed in seguito cambiarla progressivamente durante la prova in base ai vettori di controllo progettati in base al test che si vuole fare.

I passaggi per fare ciò sono elencati di seguito:

- Definizione del profilo di velocità a gradini da imporre al motore tramite due vettori: il vettore che contiene i valori di velocità nei vari “step” ed il vettore che contiene i periodi di tempo per cui mantenere ognuna di queste velocità.
- Esecuzione del profilo di velocità tramite il ciclo “for” dove si modifica il valore di velocità del messaggio di controllo ogni intervallo di tempo stabilito precedentemente nei vettori mettendo in pausa il ciclo ad ogni “step” per la durata di tale periodo.

9.5 Spegnere il motore e la comunicazione can e ricezione dei messaggi.

Infine, una volta completato il test è possibile spegnere il motore e ricevere tutti i messaggi contenuti all’interno del canale, sia di controllo sia di feedback del motore. Questi ultimi durante la trasmissione sono messaggi in codice binario di 8 byte ma una volta ricevuti vengono già tradotti in segnali decimale con significato fisico grazie alle indicazioni fornite dal database associato al canale. I passaggi seguiti dal codice sono i seguenti:

- Spegnere il motore disabilitando il “SW enable”.
- Interrompere il canale di comunicazione can.
- Ricevere i messaggi dal canale e salvarli in una tabella, sia i messaggi di controllo sia i messaggi di stato che il motore ha fornito durante il test.
- Salvare i dati.
- Estrarre dalla tabella i messaggi già decodificati grazie alla funzione “canSignalTimetable”.

9.6 Rappresentazione dei dati acquisiti in grafici.

Una volta ricevuti e salvati tutti i messaggi e quindi tutte le grandezze fisiche in gioco che il motore è capace di fornire vengono graficati per poter visualizzare come questi variano durante il test e verificare il comportamento del motore durante la prova. In particolare, le grandezze che il motore fornisce come feedback nei messaggi di stato sono:

- Velocità reale in rpm.
- Corrente richiesta dall’alimentazione.
- Potenza.
- Coppia applicata.
- Temperatura.

9.7 Soluzioni di possibili errori

In questa sezione sono elencati i problemi che sono stati riscontrati durante le prove svolte durante l’attività e la loro risoluzione.

- Nel canale CAN impostare prima la trasmissione periodica del messaggio e poi avviare il canale con il comando “start(canch)”. Se non avviene ciò non avverrà alcuna trasmissione.
- Avviare la ricezione dei messaggi dal canale tramite la funzione “receive” solamente dopo aver stoppato il canale con il comando “stop”. Questo per evitare che il canale non si fermi correttamente dopo il comando.
- Se avviene una mancata esecuzione del test nonostante la corretta esecuzione dello script compiere le seguenti operazioni in sequenza:
 - Spegnerne l’alimentazione da 48 Volt.
 - Disabilitare “HW enable”.
 - Spegnerne l’alimentazione da 12 Volt.

In seguito, eseguire nuovamente l’accensione come indicato precedentemente, ovvero:

- Accendere l’alimentatore da 12 Volt.
- Abilitare “HW enable”.
- Accendere l’alimentazione da 48 Volt.

9.8 Interazione utente

A questo punto è stato aggiunto al codice la parte di interazione con l’utente in modo da fare scegliere ad esso la tipologia di test da far eseguire al motore ed il numero di volte da ripeterlo.

Innanzitutto, sono state definite delle funzioni per la definizione di tre tipologie di profili di velocità differenti e per il loro invio utilizzando una struttura analoga allo script precedentemente descritto. In particolare, le funzioni create replicano tutti i punti dello script precedentemente descritto per la comunicazione con il motore, e si differenziano solamente nel punto 4 dove si definisce il profilo di velocità che si invia al motore. I profili di velocità richiamati dalle funzioni sono i seguenti:

- Profilo di velocità a gradini: Profilo di velocità con tre gradini ascendenti di valore 100 rpm, 150 rpm e 200 rpm e tempo di permanenza ad ogni valore di 5 secondi, ed in seguito ulteriori tre gradini analoghi ma discendenti fino a fermare il motore.
- Profilo di velocità a rampa: profilo di velocità che partendo da fermo porta il motore alla velocità di 200 rpm in modo lineare per una durata di 10 secondi, permane a tale velocità per 5 secondi ed infine ritorna ad una velocità nulla eseguendo una rampa analoga alla precedente ma discendente.
- Profilo a velocità costante: profilo di velocità con un unico gradino che porta il motore ad una velocità di 150 rpm e mantiene tale velocità per 10 secondi ed inseguito lo arresta.

Inoltre, è stata aggiunta al codice un’ulteriore parte per permettere l’interazione con l’utente in modo tale da fare scegliere ad esso quale profilo di velocità far compiere al motore e quante volte ripeterlo. A questo punto lo script è composto delle sezioni elencate di seguito:

- Sezione per fare scegliere all’utente quale profilo di velocità far compiere al motore.

- Sezione per richiamare le varie funzioni precedentemente descritte a seconda della scelta dell'utente.
- Sezione per chiedere all'utente se vuole continuare con l'opzione scelta, cambiarla oppure fermare il test.

Nella seguente figura è illustrato come si presenta sulla "command window" di Matlab l'interfaccia così creata e in che modo si interagisce con essa. In particolare, l'esempio tratta il caso di scelta da parte dell'utente di compiere un unico profilo a gradini ed in seguito fermare il motore.

```

Command Window
Scegli una delle seguenti opzioni:

1. Profilo velocita a gradini
2. Profilo velocita a rampa
3. Profilo velocità costante
4. Interrompere lo script

Inserisci il numero dell"opzione scelta: 1
Profilo velocita a gradini in corso:
Velocità corrente: 0
Velocità corrente: 100
Velocità corrente: 150
Velocità corrente: 200
Velocità corrente: 150
Velocità corrente: 100
Velocità corrente: 0
Vuoi ripetere l"opzione (1), cambiare opzione (2), o fermarti (3)? 3
Fermato.

```

Figura 51. Esempio dell'interfaccia Matlab durante i test del motore

CAPITOLO 10: SVILUPPO PIATTAFORMA DI TESTING DEL MOTORE

Una volta testato il corretto funzionamento del codice Matlab per la comunicazione CAN con il motore e messo a punto l'interazione con l'utente, l'attività successivamente svolta è stato lo sviluppo di un tool sulla falsa riga dello script, ovvero con lo stesso scopo, in modo da rendere l'attività di testing del motore molto più sofisticato e controllabile dall'utente per rendere i test ancora più personalizzabili e completi. Il tool è stato sviluppato nell'ambiente "App Designer" di Matlab dove è stato possibile creare un'interfaccia totalmente personalizzata dove sono stati inseriti principalmente vari pulsanti a cui sono stati associati i corrispettivi codici per l'esecuzione dei vari passaggi da dover svolgere per il controllo del motore via CAN.

L'obiettivo prefissato durante la creazione di questa interfaccia è stato quello di rendere il controllo del motore durante i test il più completo e sofisticato possibile, dunque, a differenza del codice originario spiegato precedentemente, per raggiungere tale obiettivo, è stata aggiunta la possibilità sia di importare e sia di creare direttamente nel tool dei profili personalizzati dall'utente. Questa caratteristica permette all'applicazione di poter essere più versatile e di poter essere utilizzata per far compiere al motore qualsiasi andamento di velocità possibile per soddisfare tutti i possibili test che si vogliono applicare ad esso. In particolare, questo aspetto è stato pensato per poter far compiere al motore i tipici cicli omologativi per i veicoli in modo da poterlo testare al meglio in reali condizioni di guida, e quindi per poter studiare meglio il suo comportamento in tali situazioni reali.

Dunque, questo capitolo verterà alla descrizione dell'interfaccia intitolata "Testing Motor Tool" creata appositamente per conseguire varie tipologie di test con il motore e, nel particolare, alla descrizione sia di come utilizzarla e sia dei codici sviluppati che stanno dietro ad essa e che permettono la corretta esecuzione delle prove.

10.1 Manuale per l'utilizzo del "Testing Motor Tool"

"Testing Motor Tool" è l'applicazione sviluppata tramite l'App Designer di Matlab per testare il motore tramite profili di velocità diversi: a gradini, a rampa e a velocità costante ed infine profili personalizzabili da importare da file Excel oppure da creare direttamente nel Tool.

In particolare, l'applicazione permette di avviare un canale di comunicazione CAN con il motore tramite il dispositivo PCAN-USB di Peak System ed avviare una trasmissione di messaggi CAN in modo da far compiere ad esso varie tipologie di profili di velocità. In seguito, il Software permette di ricevere tutti i dati forniti dal motore in formato di messaggi, decodificarli, graficarli e salvarli nella cartella corrente.

I profili di velocità che Testing Motor Tool è in grado di far compiere al motore sono nello specifico:

- Un profilo di velocità che varia a gradini fino ad un valore massimo inserito dall'utente. Nello specifico il test è suddiviso in tre gradini ciascuno della durata di 5 secondi di un valore rispettivamente: velocità massima/2,5, velocità massima/1,5 e velocità massima. In seguito, vengono effettuati altrettanti gradini degli stessi valori fino a fermare il motore.

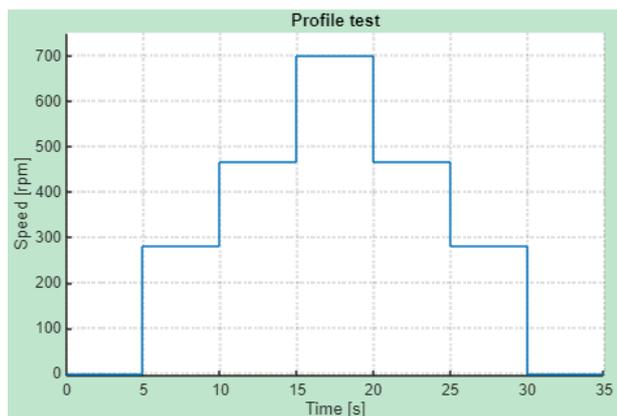


Figura 52. Profilo a gradini.

- Un profilo di velocità a rampa che varia partendo da 0 rpm fino al valore della velocità massima impostata dall'utente in 10 secondi, rimane costante e pari a questa velocità per 5 secondi ed infine cala con lo stesso andamento a rampa discendente fino a fermare il motore.

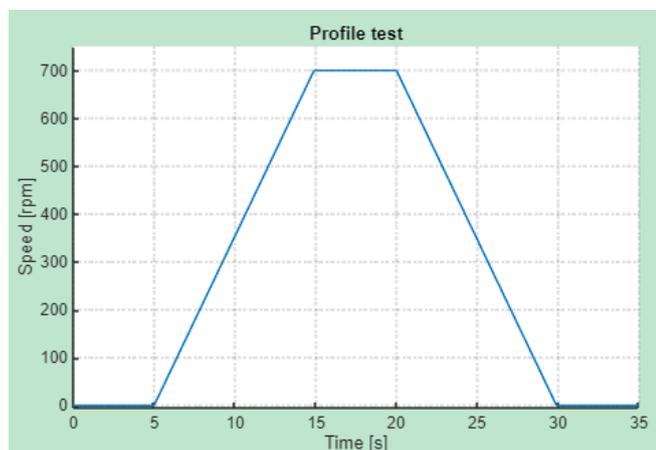


Figura 53. Profilo a rampa.

- Un profilo che mantiene la velocità costante impostata dall'utente per 10 secondi e poi ferma nuovamente il motore.

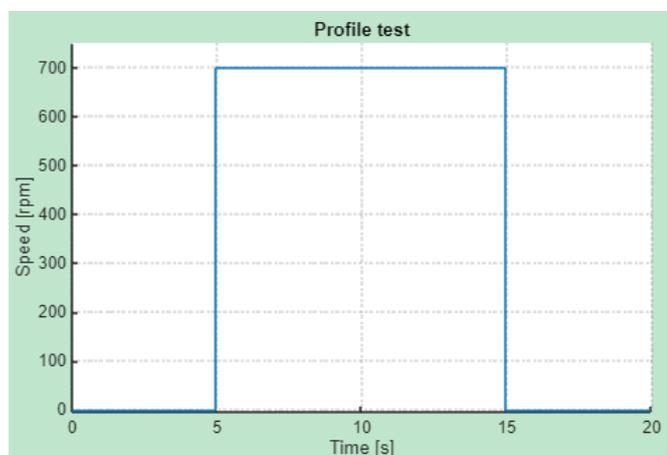


Figura 54. Profilo a velocità costante.

- Un profilo personalizzato da importare da un file Excel oppure da creare direttamente all'interno dell'interfaccia.

Nella seguente sezione verranno spiegati tutti i passaggi da seguire per un corretto utilizzo dell'applicazione e una corretta esecuzione dei test del motore.

10.1.1 Schermata principale dell'applicazione:

L'interfaccia del tool è composta principalmente dalle seguenti parti:

- La sezione di sinistra dove rispettivamente è possibile avviare il canale CAN di comunicazione, impostare la tipologia di profilo di velocità da fare compiere al motore e le varie caratteristiche da attribuire al test, ovvero la velocità massima da raggiungere e il numero di ripetizioni del profilo, ed infine avviare il test.
- La sezione di destra utile per la visualizzazione del profilo scelto da far compiere al motore durante il test e la sua risposta in tempo reale.
- Infine, premendo la sezione "Results" e "Speed" nella barra del menu, è possibile visualizzare tutti i risultati disponibili dopo l'esecuzione del test del motore.

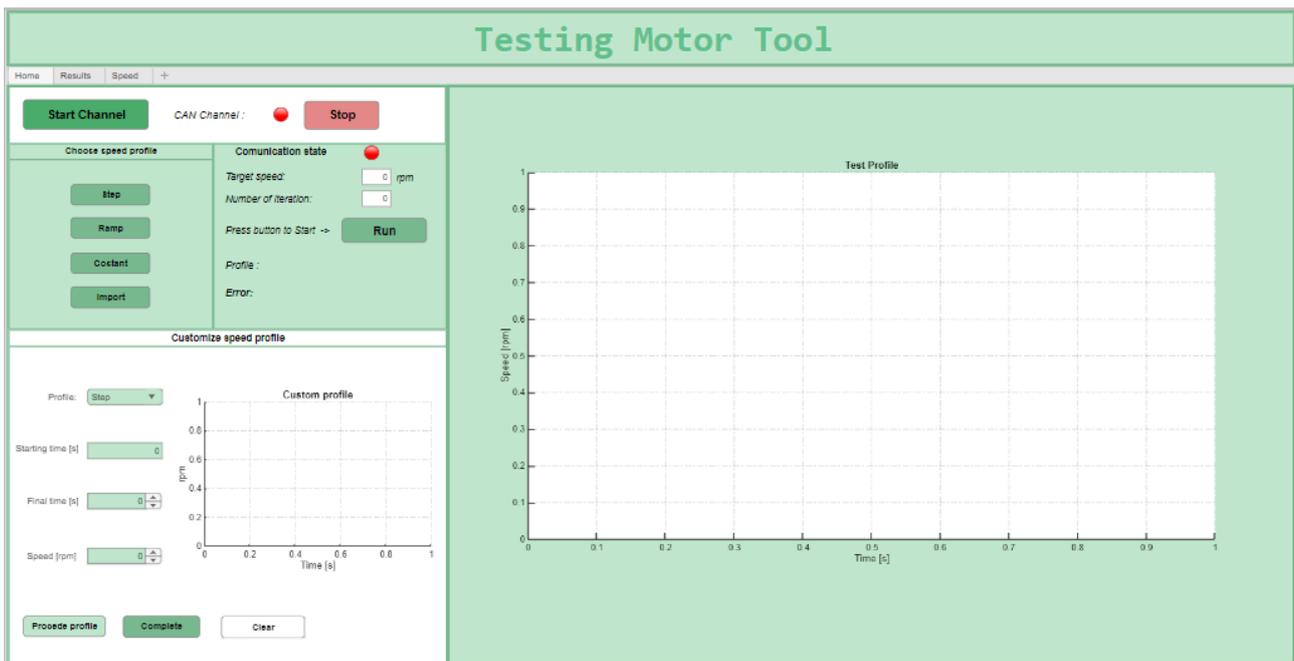


Figura 55. Schermata principale del Testing Motor Tool progettato.

Una volta spiegata l'interfaccia nei paragrafi sottostanti verranno spiegati tutti i passaggi da compiere per utilizzarla correttamente al fine conseguire i test con il motore.

10.1.2 Avviare il canale CAN

Per avviare il canale CAN di comunicazione con il motore è necessario premere il tasto verde denominato "Start Channel". In seguito a questa operazione il led denominato "CAN Channel" diventerà verde e verrà creato il canale di comunicazione con il motore dove verranno trasmessi

tutti i messaggi CAN di controllo e verranno ricevuti tutti i messaggi che il motore fornisce come risultati della prova. Come spiegato nel capitolo precedente questo è reso possibile grazie all'utilizzo dell'adattatore PCAN-USB di "Peack System" con il quale Matlab è capace di comunicare.



Figura 56. Avvio del canale.

A questo pulsante, a livello di codice, sono associati i comandi di apertura del canale, definizione del messaggio e settaggio dei valori dei segnali contenuti in esso e l'impostazione della trasmissione periodica di questo messaggio nel canale.

10.1.3 Scegliere un profilo di velocità prestabilito da far compiere al motore

Premendo il pulsante corrispondente alla tipologia di test che si vuole conseguire nell'elenco denominato "Choose speed profile" è possibile scegliere uno dei profili di velocità prestabiliti e descritti in precedenza da fare compiere al motore.

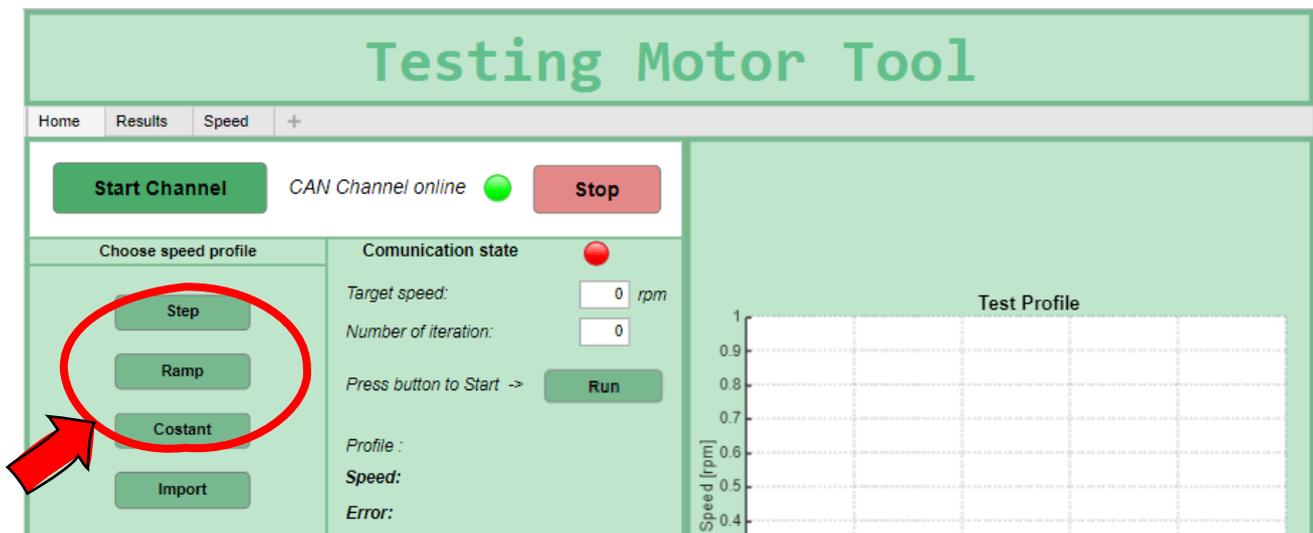


Figura 57. Scelta del profilo.

Questa operazione definisce il profilo di velocità che in seguito verrà inviato al motore tramite i messaggi CAN che verrà mostrato nel grafico affianco intitolato "Test Profile". La logica che ci sta dietro è la creazione di vettori contenenti i valori di velocità e di tempo che saranno associati ai messaggi CAN durante un ciclo che gestisce la loro trasmissione. Questo ciclo, quindi, cambierà il valore della velocità di controllo nel messaggio CAN che si trasmette periodicamente nel canale con una certa frequenza in base al profilo scelto.

Si evidenzia in particolare che la definizione di tutti i profili viene creato come unione di tanti gradini con una brevissima ampiezza temporale di 0,1 secondi in modo da poter trasmettere il profilo in maniera più fedele possibile.

10.1.4 Settaggio del test

A questo punto è necessario indicare il valore di velocità massima che si vuole raggiungere durante il test in rpm, da cui derivano tutte le altre in base al tipo di profilo scelto, nella casella da compilare denominate "Target speed" e il numero di volte per cui si vuole ripetere il profilo nella casella indicata come "Number of iteration". Successivamente a queste azioni verrà aggiornato il grafico "Test Profile" a fianco mostrando il profilo così definito che verrà inviato durante il test. Infine, premere il pulsante "Run" sottostante per iniziare la trasmissione e l'esecuzione da parte del motore dell'andamento scelto. Finché non vengono inseriti numeri diversi da zero il test non parte, le caselle diventano gialle e il led "Comunication state" rimane rosso.

Invece, una volta inseriti i valori, sarà necessario premere il pulsante "Run" per fare avviare la trasmissione del profilo. A questo punto il led "Comunication state" diventerà verde e si potrà monitorare lo stato di avanzamento del test nel grafico affianco denominato "Test progress" e tramite i dati che verranno visualizzati sotto il pulsante appena premuto dove sarà riportato lo stato di avanzamento del test e i possibili errori se sussistono. In questo grafico verrà visualizzato il profilo target definito per la prova nella sua completezza e contemporaneamente la velocità del motore che si aggiornerà in tempo reale resa disponibile dai messaggi di stato ricevuti durante la comunicazione CAN.

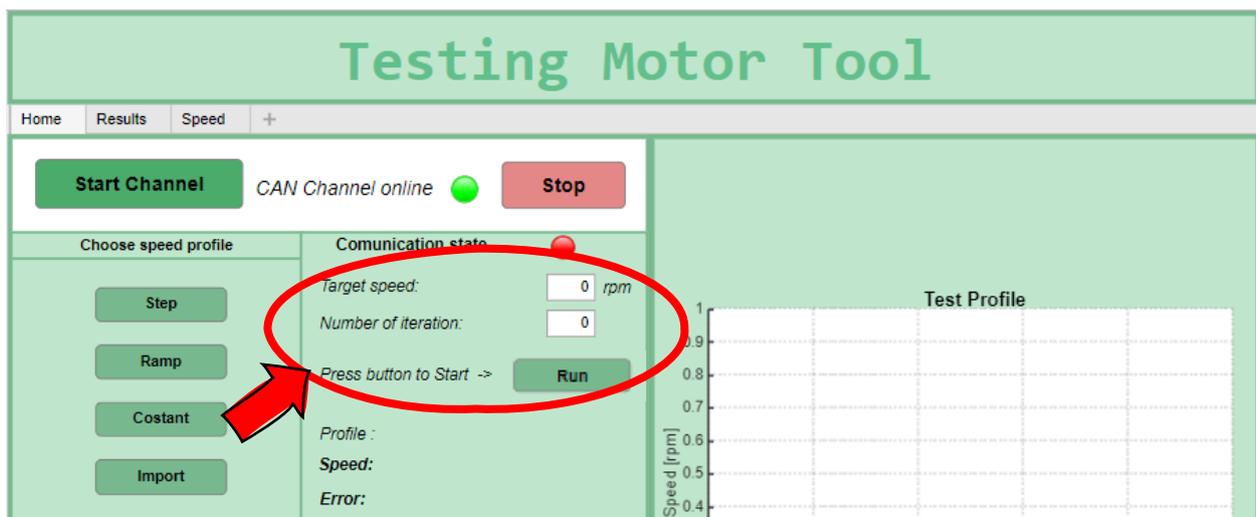


Figura 58. Impostazione del test.

Dal punto di vista del codice la fondamentale funzione che avviene prima dell'avvio della trasmissione è un ricampionamento dei vettori di controllo che definiscono il profilo da inviare discretizzandoli in base alla frequenza di trasmissione impostata nel canale; questo rende concorde la velocità di trasmissione con i dati da inviare in qualunque modo vengano definiti. Prendendo come esempio la rampa, profilo più complesso da inviare, viene discretizzata in questo modo in piccoli gradini della durata di 20 ms, ovvero il periodo impostato per la trasmissione dei messaggi nel canale, in modo da inviare durante la prova messaggi consecutivi diversi al fine di inviare un reale profilo a rampa invece che a piccoli gradini, come nel caso in cui più messaggi consecutivi abbiano lo stesso valore.

In seguito, la trasmissione dei messaggi contenenti il profilo definito è gestito da un ciclo "while" associato al pulsante "Run". Questo ciclo itera i comandi contenuti al suo interno finché non viene premuto il pulsante "Stop", ovvero il pulsante di arresto del motore e della comunicazione, oppure

finché non si completa la prova. Nello specifico ad ogni iterazione viene confrontato il tempo di esecuzione reale, monitorato con un timer fatto partire al momento dell'avvio del test, e il tempo teorico del profilo che si vuole inviare a cui corrisponde un certo valore di velocità. Dunque, una volta raggiunto un certo tempo a cui corrisponde un certo valore di velocità target da raggiungere, a seconda del profilo di controllo definito in precedenza, viene aggiornato il valore del segnale all'interno del messaggio CAN di controllo con il corretto valore della velocità per far coincidere l'andamento reale del motore con quello teorico stabilito. Inoltre, durante il ciclo avviene la ricezione dei messaggi e la loro traduzione per estrapolare il valore di velocità del motore, in modo da aggiornare il grafico in tempo reale, e la traduzione degli errori se presenti.

Si evidenzia che la logica appena descritta è utilizzata per la trasmissione di tutti i profili gestiti dal tool, in particolare anche per quelli personalizzati che verranno descritti nelle sezioni successive.

```

% Iterazione del profilo
for l = 1: app.TabtargetspeedEditField_2.Value
    i=1;
    if l > 1
        tic
    end

% Ciclo trasmissione profilo
while app.StopPressed
    drawnow;
    t_now = toc;
    i = find(abs(t_totale_new - t_now)==min(abs(t_totale_new - t_now)));

    if t_now >= t_totale_new(i)
        app.msg.Signals.Control_value_in = velocita_totale_new(i)*10;
    end

    if t_now > t_totale_new(end)
        break;
    end
end

```

Figura 59. Codice per la trasmissione del profilo di velocità al motore.

Una volta completato il test la comunicazione si interrompe, si spegne il controller del motore e vengono salvati tutti i dati della prova in formato di vettori Matlab direttamente nella cartella contenente il tool. Questi dati rappresentano tutte le grandezze rese disponibili nei messaggi di stato ricevuti durante le prove che comprendono i valori di:

- Velocità del motore
- Coppia prodotta
- Corrente DC assorbita dall'alimentatore o batteria
- Temperatura del motore
- Errori durante la prova

10.1.5 Importare un profilo personalizzato proveniente da un file Excel

Premere il pulsante denominato "Import" per fare compiere al motore un profilo di velocità personalizzato proveniente da un file Excel. Nello specifico il file Excel deve essere composto da due

colonne; nella prima colonna intitolata "Time" andranno inseriti per ogni riga i tempi di simulazione per ogni valore di velocità che saranno inseriti invece nella seconda colonna denominata "Speed".

Dunque, una volta compilato il profilo nel file Excel è possibile caricarlo nel tool premendo il pulsante "Import" ed in seguito scegliere il file del profilo nella finestra popup che si aprirà.

Infine, come per le altre tipologie di profili, per iniziare a trasmettere il profilo sarà necessario inserire il numero di iterazioni del test e premere il pulsante "Run"; a questo punto si inizieranno a visualizzare tutti i dati del test analogamente ai casi precedenti.

La trasmissione anche di questo tipo di profili è gestita sempre dallo stesso pulsante "Run" e quindi tramite la stessa logica descritta nella sezione precedente.

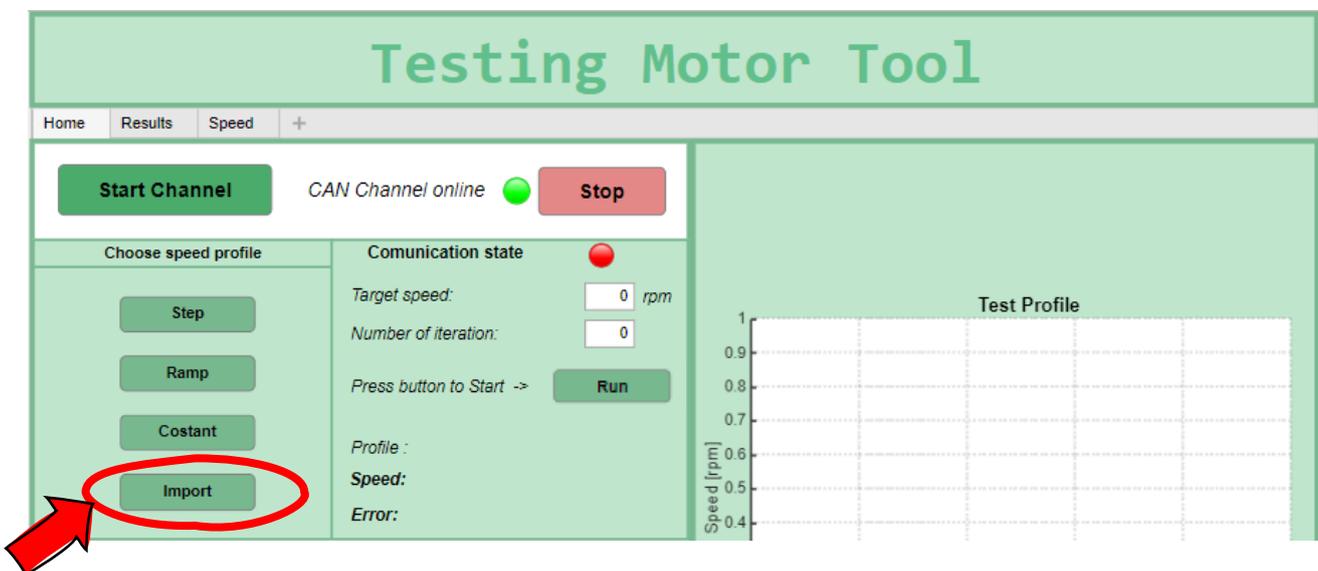


Figura 60. Importare un profile da Excell.

Il codice che sta dietro alla definizione di questa tipologia di profilo è composto dai comandi di lettura di un file Excel implementati in Matlab in modo da leggere i dati sulle colonne intitolate "Time" e "Speed", successivamente questi vengono salvati nei due vettori di controllo che vengono gestiti in seguito nella trasmissione allo stesso modo dei casi precedentemente descritti.

10.1.6 Creare un profilo personalizzato direttamente nel tool.

Nell' area sottostante ai pulsanti per la scelta dei profili preimpostati è possibile personalizzare un profilo di velocità da far compiere al motore direttamente all'interno dell'interfaccia.

In particolare, è possibile creare un test personalizzato componendo insieme dei profili elementari, a gradino oppure rampa, da scegliere nella prima casella denominata "Profile". Una volta scelto la prima parte di profilo sarà necessario indicare la sua durata, inserendo nella casella sottostante il tempo finale ed in seguito il valore di velocità target in rpm nell'ultima casella compilabile e premere il pulsante "Procede profile". A questo punto si potrà visualizzare il profilo creato fino ad ora nel grafico affianco ed in seguito si potrà andare avanti con la personalizzazione. Quindi si dovrà ripercorrere i passaggi appena indicati per definire la parte successiva del profilo ed una volta completato sarà necessario premere il pulsante "Complete".

Di seguito, è riportato un esempio di come sarà visualizzata questa sezione di personalizzazione del profilo alla fine dei passaggi precedentemente descritti:

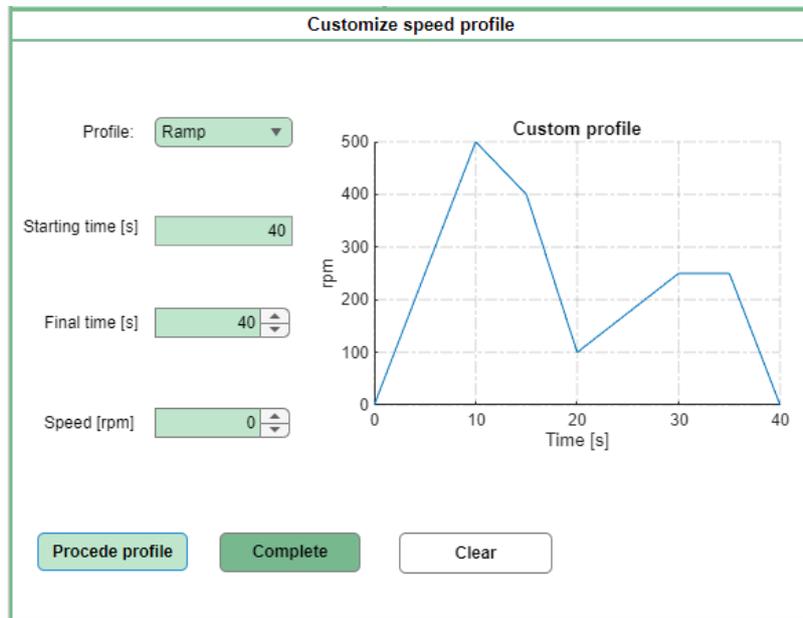


Figura 61. Esempio di profilo personalizzato creato nel tool.

Questa sezione si trova nella parte inferiore della schermata come mostrato in figura:

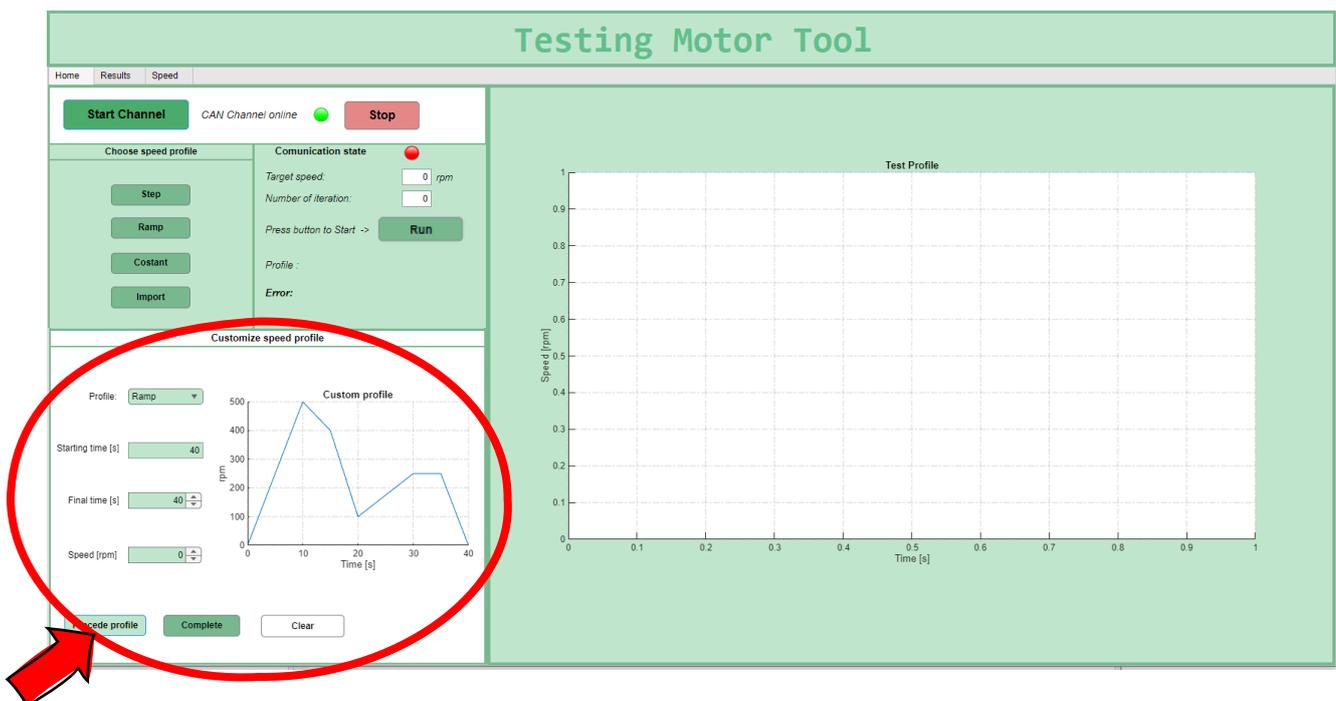


Figura 62. Creare un profilo personalizzato.

Una volta completato il profilo personalizzato e premuto il pulsante "Complete" sarà necessario inserire il numero di esecuzioni della prova per visualizzare l'andamento così creato nel grafico a

fianco. Infine, premendo il pulsante “Run” verrà cominciata la trasmissione e la ricezione dei risultati come negli altri casi.

Invece per cancellare il profilo creato in ogni momento e ripartire con la personalizzazione è sufficiente premere il pulsante “Clear” e riniziare la definizione del nuovo profilo.

I comandi Matlab per rendere possibile tale costruzione personalizzata del profilo sono analoghi a quelli utilizzati nella definizione dei profili già implementati nel tool. Ovvero ad ogni tratto di profilo elementare scelto vengono usati gli stessi comandi usati precedentemente per la definizione del profilo a rampa discretizzandoli in piccoli gradini di durata 0,1 secondi, ed inseguito i vari tratti vengono uniti formando i vettori completi di controllo.

10.1.7 Schermata durante il test

Durante il test la schermata sarà composta delle seguenti informazioni:

- Nella parte sinistra dell’interfaccia dove è possibile visualizzare lo stato di avanzamento del test e i possibili errori, se presenti, che verranno evidenziati di rosso.
- Nella parte destra è presente il grafico intitolato “Test Progress” dove viene confrontata l’andamento della velocità target e quella reale del motore in tempo reale durante il test. Ovvero verrà illustrato il profilo target completo in blu e progressivamente, in tempo reale durante il test, si vedrà l’andamento della velocità reale del motore in rosso. Quest’ultimo si crea in base ai messaggi can di feedback che riceviamo dal motore durante il test.

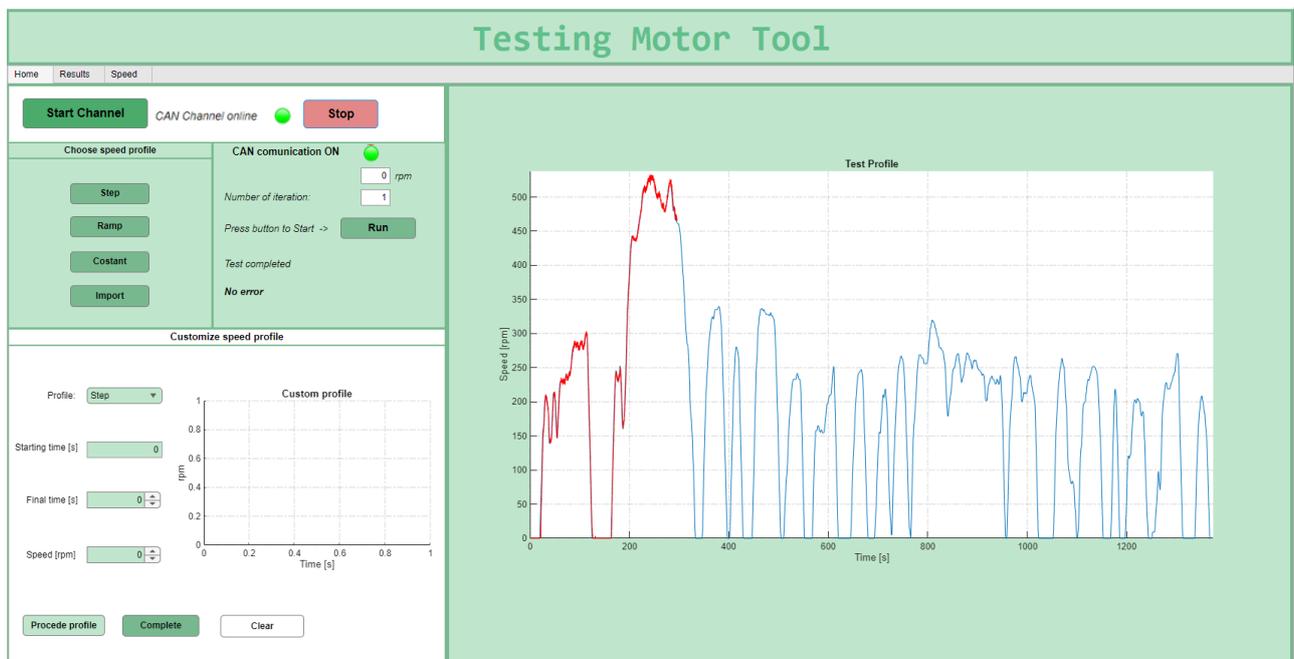


Figura 63. Interfaccia durante il test.

10.1.8 Visualizzare la totalità dei risultati

Una volta completato il test per visualizzare la totalità dei risultati sarà necessario selezionare la sezione “Results” e “Speed” nella barra del menu nella parte superiore della schermata.

Nella sezione “Result” sono presenti i grafici di tutte le grandezze di feedback che il motore è in grado di fornirci:

- Grafico con il confronto della velocità target e feedback del motore in rpm e in km/h simultaneamente.
- Grafico della corrente misurata dal motore con la possibilità di confrontarla con quella misurata dall'alimentatore premendo il pulsante corrispondente e selezionando il file Excel dell'alimentatore.
- Grafico della coppia prodotta dal motore.
- Grafico dell'andamento della temperatura del motore.

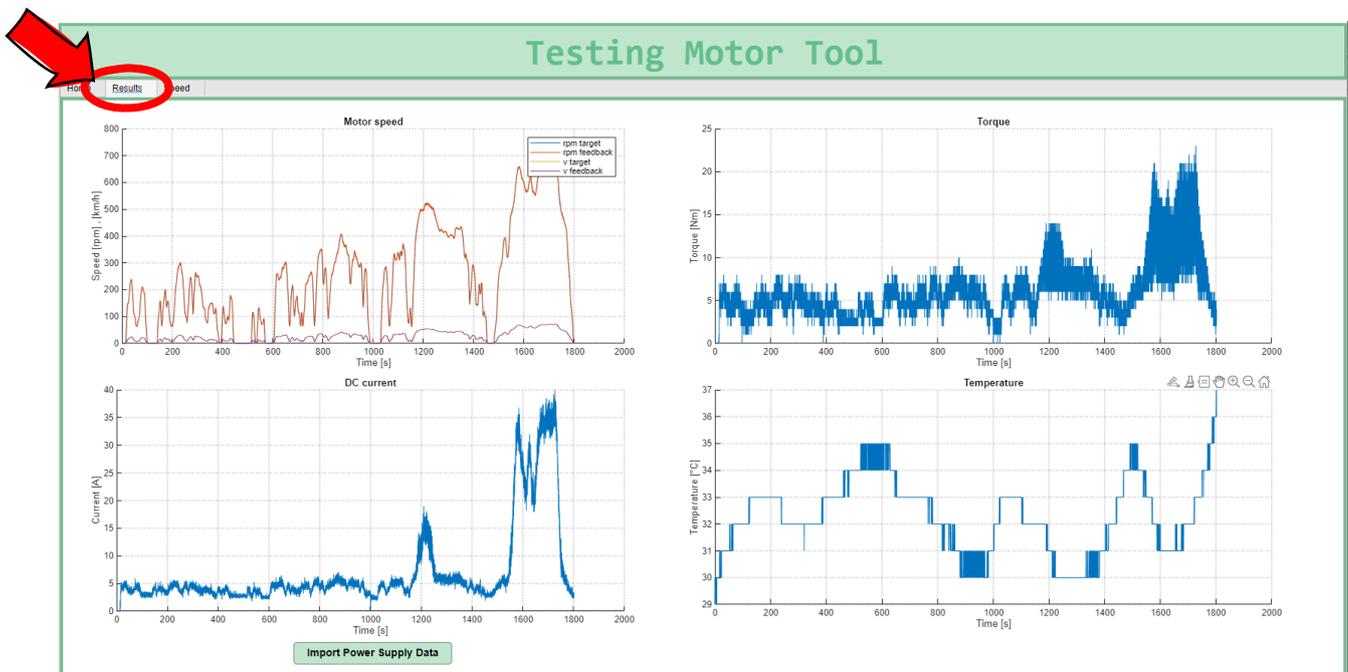


Figura 64. Sezione dei risultati del test.

Invece nella sezione “Speed” è possibile visualizzare il grafico in un formato più grande della velocità del motore durante il test rispetto a quella target che è stata inviata tramite la comunicazione CAN simultaneamente in rpm e in km/h.

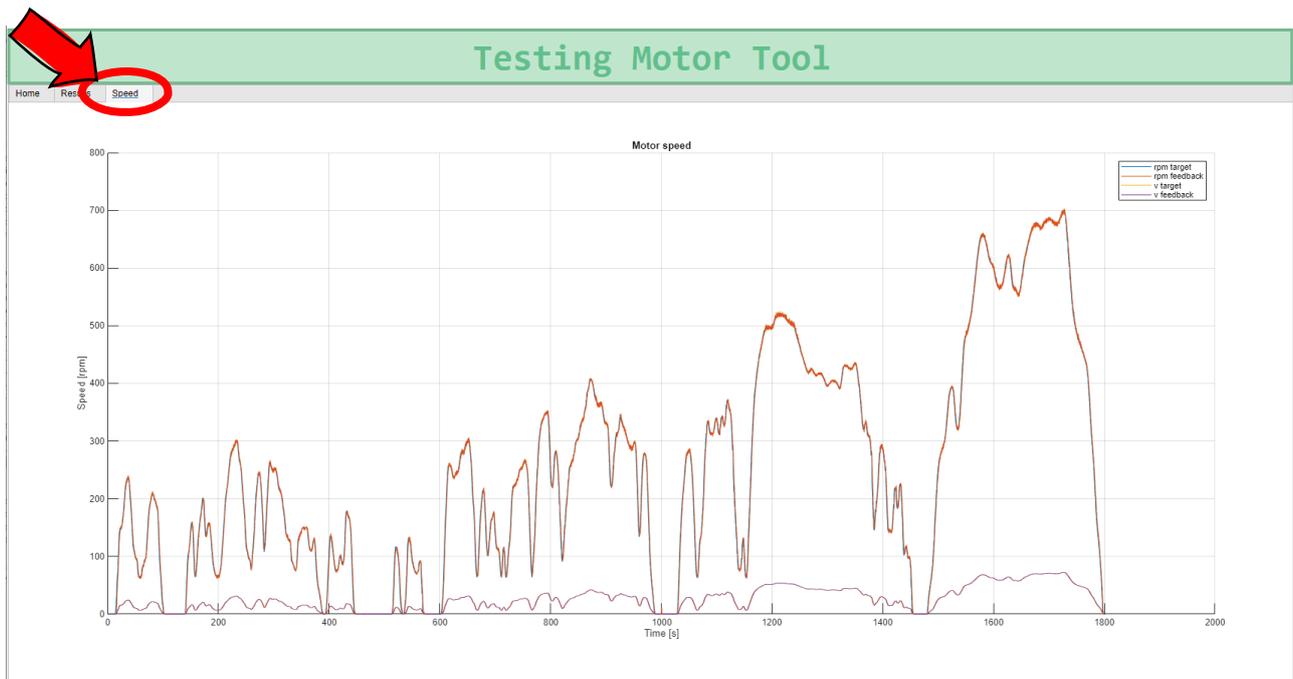


Figura 65. Seconda sezione dei risultati del test.

10.1.9 Esecuzioni successive

Una volta completato il test e visualizzati tutti i risultati messi a disposizione è possibile compiere le seguenti azioni:

- Per continuare a far compiere al motore lo stesso profilo di velocità basta premere nuovamente il pulsante di tale profilo e reinserire il valore di “target speed” desiderato (la casella dove inserire il valore di velocità diventerà gialla nuovamente).
- Per cambiare profilo da fare compiere al motore è necessario premere il pulsante che indica il tipo di test che si vuole applicare e inserire il nuovo valore di velocità target.
- Per interrompere il test bisogna premere il pulsante rosso denominato “Stop”. Questo interromperà il canale di comunicazione CAN e spegnerà il motore.

10.1.10 Interruzione manuale del test

Per interrompere il test in qualsiasi momento, anche durante l’esecuzione di un profilo, è necessario premere il pulsante rosso denominato “Stop”. Questa operazione causerà:

- L’arresto e lo spegnimento del motore e per indicare ciò i led diventeranno tutti rossi.
- L’interruzione del canale di comunicazione.

Dunque, per poterlo riavviare, in modo da iniziare nuovi test con il motore, sarà necessario premere nuovamente il pulsante verde “Start Channel” e ripercorrere tutti i passaggi precedenti.

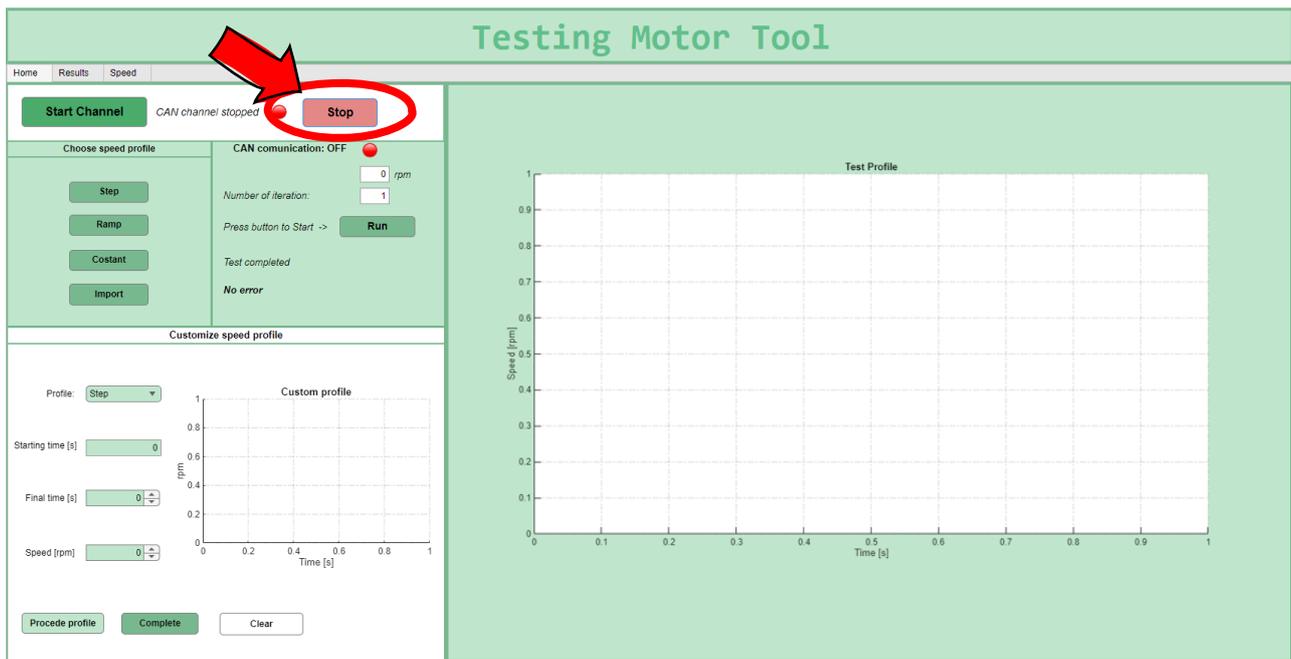


Figura 66. Interruzione dei test.

10.1.11 Risoluzione di possibili problemi

1. Se si riscontra una mancata esecuzione del test nonostante aver percorso la corretta procedura spiegata precedentemente è stato verificato come necessario compiere la seguente sequenza di azioni:
 - Spegnere l'alimentazione da 48 Volt.
 - Disabilitare "HW enable" tramite l'interruttore manuale.
 - Spegnere l'alimentazione da 12 Volt.

In seguito, eseguire nuovamente l'accensione con la seguente sequenza:

- Accendere l'alimentatore da 12 Volt.
 - Abilitare "HW enable".
 - Accendere l'alimentazione da 48 Volt.
2. Se una volta scelto un profilo non si vuole procedere con la sua esecuzione ma si vuole cambiare tipologia di prova è necessario per prima cosa arrivare a definire il numero di iterazioni per il profilo sbagliato ed in seguito premere il pulsante corrispondente al profilo corretto. Per sicurezza tra le due operazioni è opportuno premere il pulsante "Clear" in modo da cancellare tutti i vettori di controllo creati in precedenza e cancellare anche tutti i grafici ad essi associati.

CAPITOLO 11: TEST CONSEGUITI CON “TESTING MOTOR TOOL”

Nel seguente capitolo verranno descritti i test eseguiti con il motore grazie all'utilizzo del tool appositamente creato. In particolare, queste prove sono utili per caratterizzare il motore e comprendere al meglio il suo comportamento in termini di prestazioni visto che il suo scopo sarà quello di produrre la trazione di una vettura da competizione. Ad esempio, un dato fondamentale per lo scopo del progetto è comprendere quanto sia la richiesta energetica del motore in diverse configurazioni di funzionamento che verrà fornita nell'applicazione finale dalla batteria. Questo al fine di eseguire innanzitutto dei test sulla batteria tramite cicli di carica e scarica seguendo tale richiesta misurata con il motore per poterne caratterizzare il comportamento, ed in seguito comprendere come gestire l'energia da fornire alla batteria per mantenerla sempre ad un ottimale “state of charge” durante il suo funzionamento. Questa energia viene fornita nella vettura in esame, come descritto nella presentazione del progetto, sia dal sistema di pannelli solari sia dalla fuel cell; quindi, risulta di fondamentale importanza comprendere al meglio quale sia la richiesta che questi due sistemi devono soddisfare al fine di poter progettare al meglio la gestione energetica del veicolo al fine di renderlo competitivo nelle competizioni in cui si andrà a cimentare.

Dunque, per studiare al meglio il motore in dotazione sono stati conseguiti durante l'attività di test varie tipologie di prove; partendo dalle più semplici, ovvero a gradino, rampa e velocità costante già implementate nel tool, proseguendo con quelle più personalizzate fino ad arrivare alla realizzazione dei reali cicli di omologazione dei veicoli in modo da poter simulare e studiare il comportamento del motore in reali condizioni di guida. Questo ultimi test sono stati considerati di grande importanza perché simulano reali andamenti di guida senza dover necessariamente fare test reali in vettura, quindi per poter comprendere innanzitutto le reali prestazioni del motore, ed in seguito per definire le reali richieste di energia che richiederà alla batteria una volta inserito in vettura. Questi dati quindi permetteranno, come scritto in precedenza, uno sviluppo di una ottimale gestione di energia del veicolo dalle diverse fonti di cui è dotato per poterlo rendere più efficiente e prestazionale possibile.

11.1 Profili implementati nel Testing Motor Tool

In primo luogo vengono riportati i test già implementati nel tool che è possibile conseguire impostando solamente i valori di velocità target da raggiungere durante la prova.

11.1.1 Test con profilo a gradini

Il primo profilo preso in esame è un profilo contenente tre gradini di velocità le cui caratteristiche sono descritte nel capitolo precedente, in particolare è stata settata come velocità massima da raggiungere 400 rpm e una ripetizione del ciclo di due volte. I risultati in termini di velocità target e feedback del motore sono illustrati nel grafico sottostante.

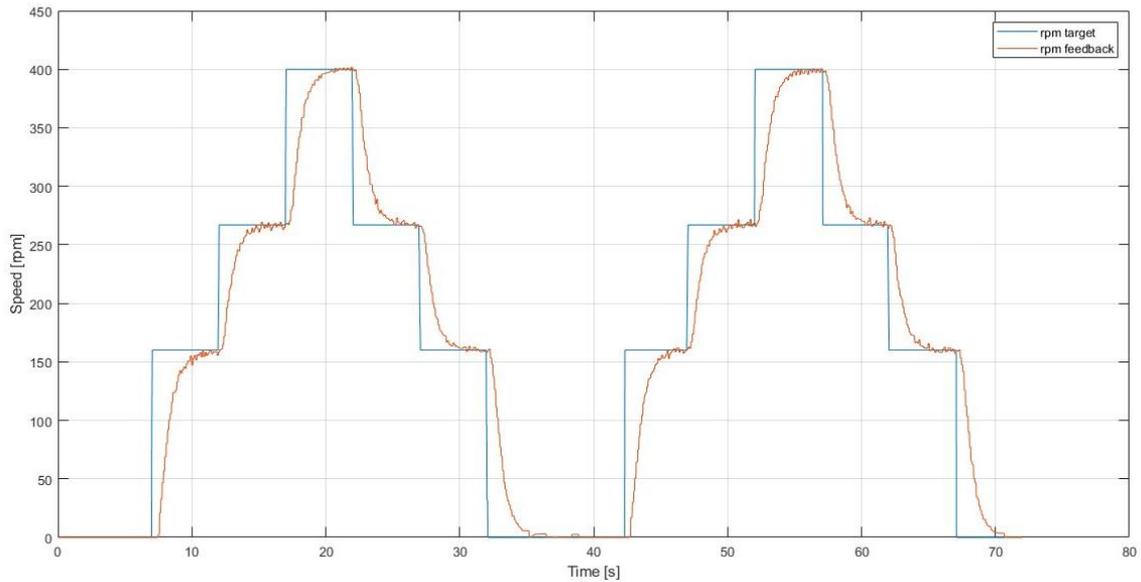


Figura 67. Profilo di velocità a gradini.

In seguito, sono riportati anche i risultati della prova in termine di corrente richiesta dall'alimentatore misurata dal motore, resa disponibile dai messaggi di feedback, ed in seguito anche misurata dall'alimentatore stesso, grazie alla sua capacità di registrare i dati durante la prova e di salvarli su una chiavetta USB. Per fare ciò si è scelta una frequenza di campionamento per il salvataggio dei dati dell'alimentatore di 100 Hz ed in seguito sono stati filtrati i segnali.

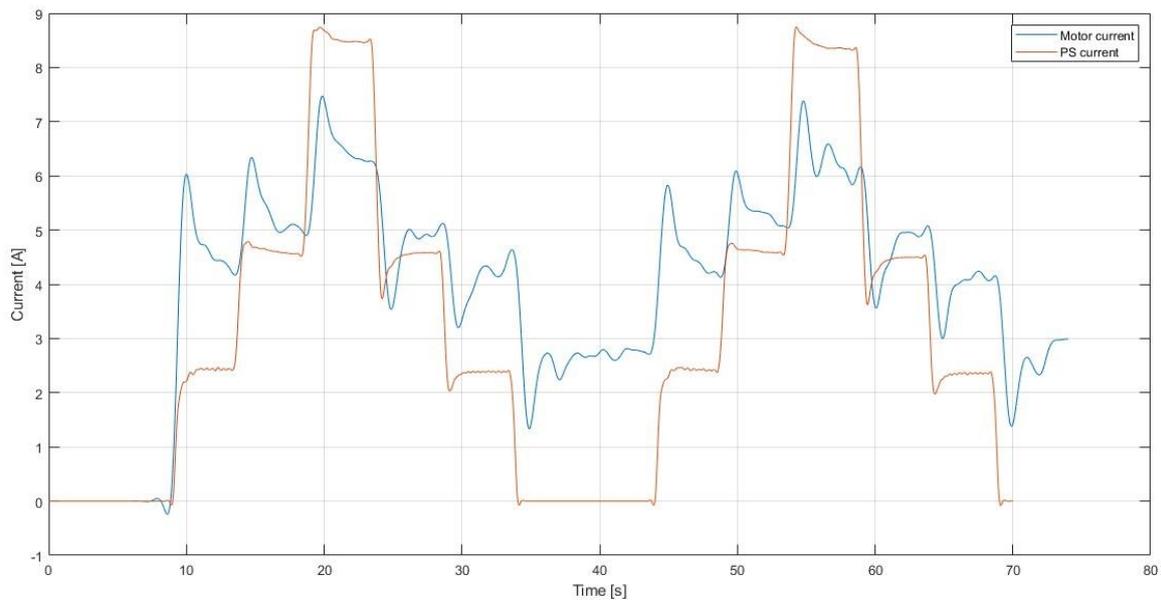


Figura 68. Corrente misurata dal motore e dall'alimentatore.

11.1.2 Test con profilo a rampa

Come secondo profilo già implementato si prende in considerazione il profilo a rampa ripetuto due volte dove è stata raggiunta una velocità massima di 400 rpm. In seguito sono riportati gli stessi grafici dei risultati come nel caso precedente.

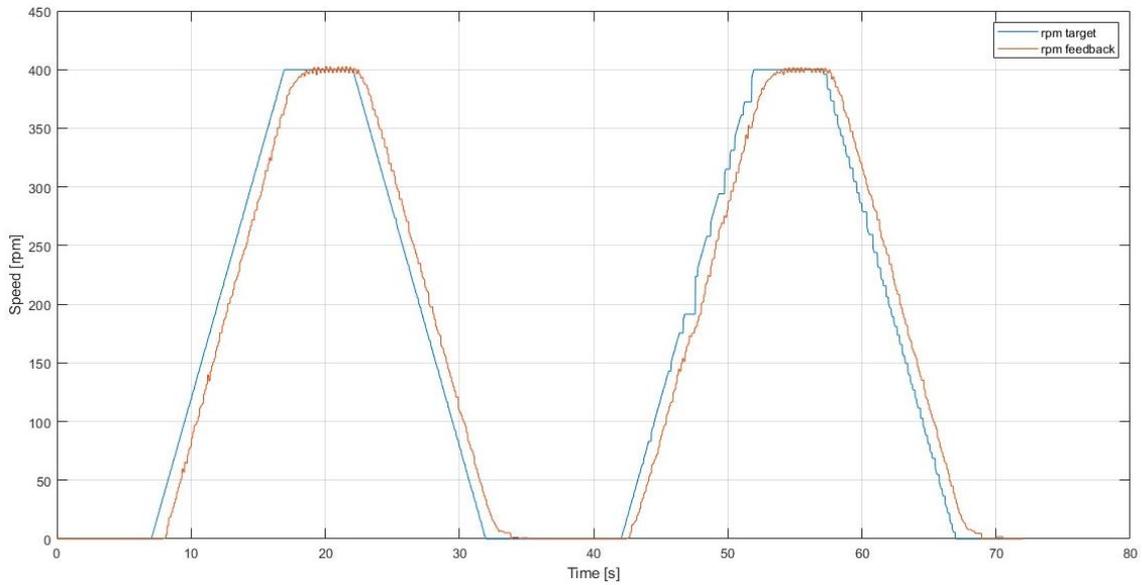


Figura 69. Risultati profilo di velocità a rampa.

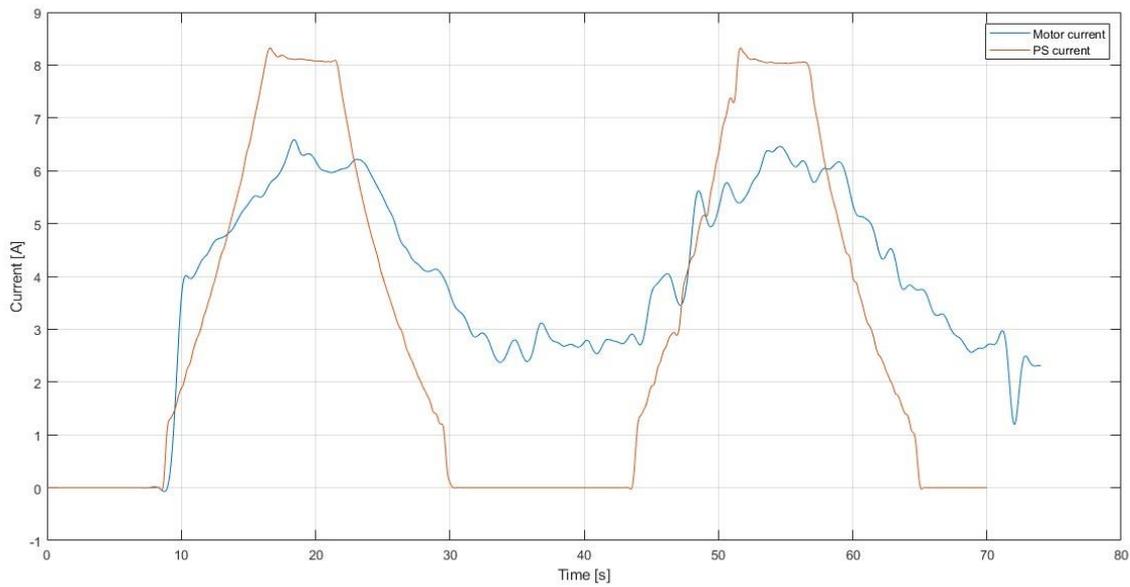


Figura 70. Corrente misurata dal motore e dall'alimentatore.

11.1.3 Test con profilo costante di velocità

Come ultimo profilo già implementato nell'applicazione sono riportati i risultati di un test caratterizzato da un profilo costante ripetuto due volte dove viene mantenuta una velocità di 300 rpm.

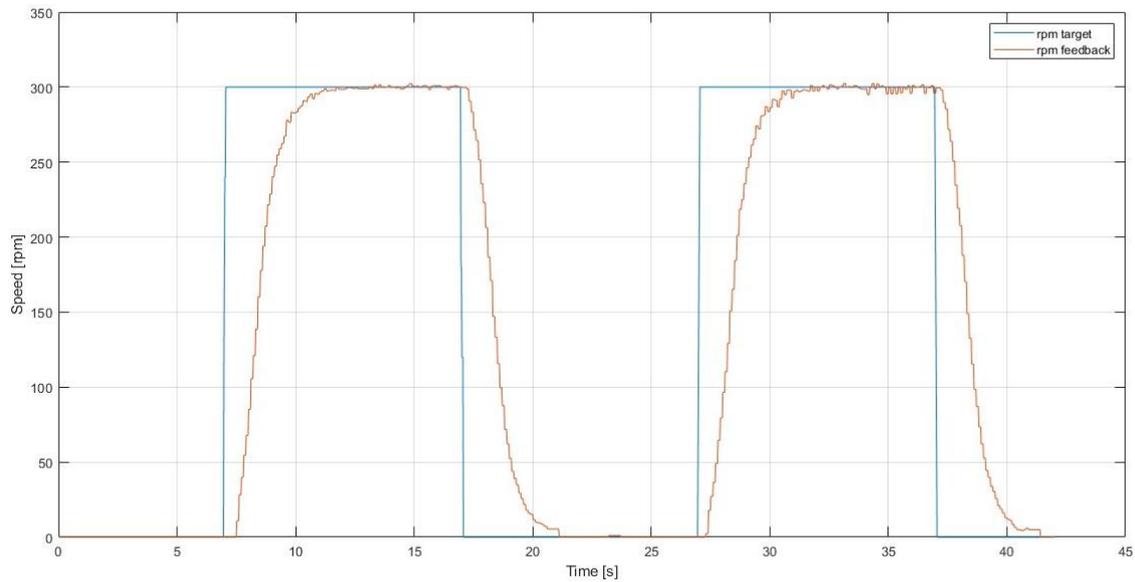


Figura 71. Risultati profilo costante.

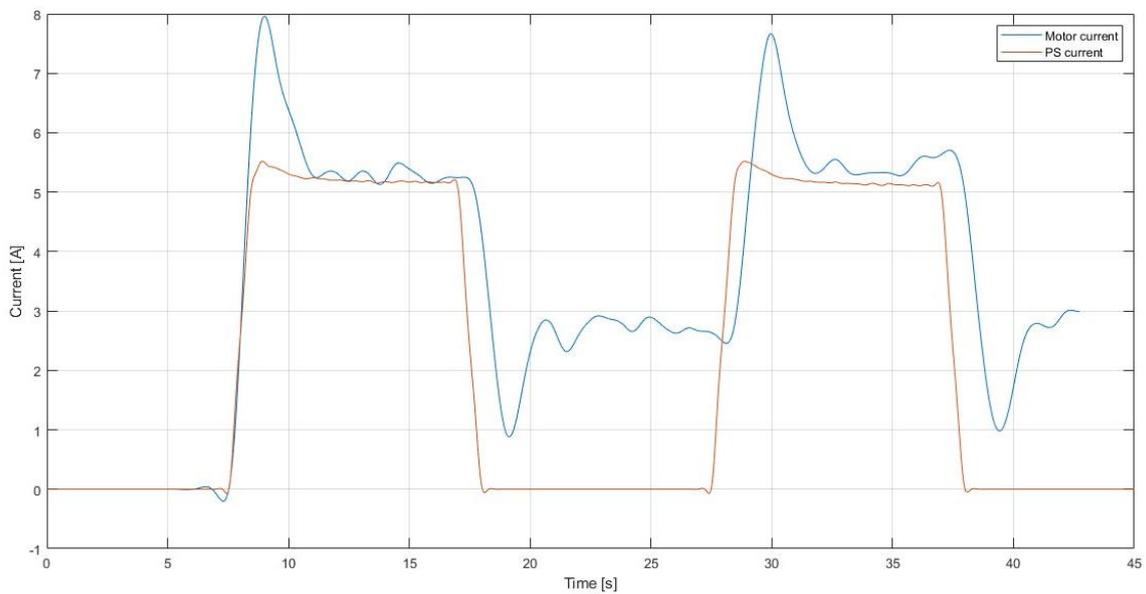


Figura 72. Corrente misurata dal motore e dall'alimentatore.

11.2 Ciclo guida NEDC

NEDC (New Europea Driving Cycle) è stato il ciclo di guida standardizzato che si applicava a tutte le autovetture e ai veicoli commerciali leggeri prima dell'avvento del nuovo ciclo guida che lo ha sostituito, il WLTP. Questo è stato introdotto dall'Unione Europea nel 1992 per misurare il consumo di carburante e le specifiche emissioni dei veicoli simulando dei cicli guida stradali urbani e extraurbani e fornire così valori e risultati comparabili. Questa tipologia di ciclo poi è stata sostituita con il più moderno WLTP perché non riusciva a replicare al meglio il reale consumo dei veicoli visto che rappresentava una grande semplificazione di un possibile andamento reale di un veicolo.

Le caratteristiche del primo ciclo guida preso in considerazione per i test sono elencate di seguito:

- La distanza era di circa 11 km
- La durata del ciclo era di circa 20 minuti
- Il ciclo consisteva in due fasi:
 - circa 13 minuti di guida simulata in città
 - circa 7 minuti di guida simulata su strada extraurbana
- La velocità media era di circa 33 km/h
- Il veicolo non si muoveva il 25% delle volte
- La velocità massima testata era di 120 km/h

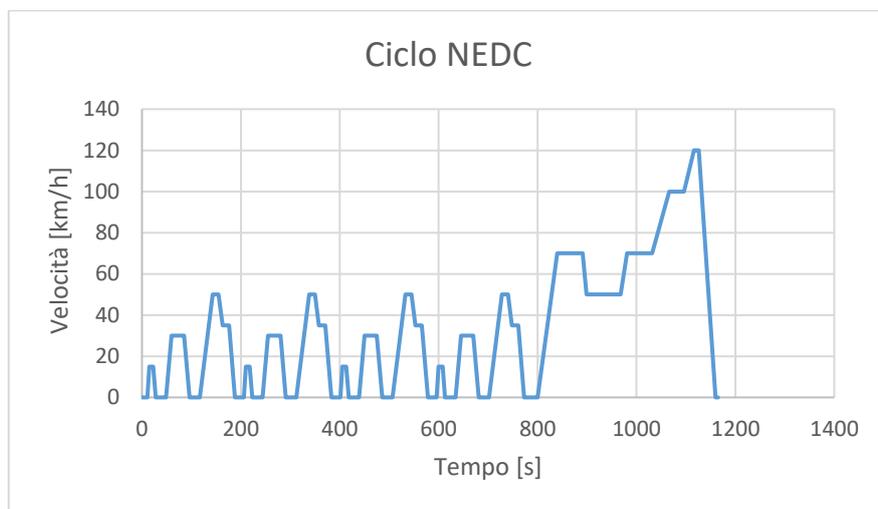


Figura 73. Ciclo NEDC.

Come si nota dal grafico il ciclo prevede il raggiungimento di una velocità che raggiunge al massimo i 120 km/h, ovvero un valore che non risulta essere raggiungibile dal motore preso in esame dai dati forniti dalla scheda tecnica. Infatti, considerando un diametro ruota di 440 mm e una velocità massima dichiarata di 700 rpm, la velocità massima raggiungibile dal motore risulta essere circa 75 km/h. Per questo motivo è stato necessario scalare il ciclo NEDC da fare compiere al motore per poterlo ridimensionare a seconda delle sue prestazioni massime mantenendo comunque intatta la sua forma. Nel grafico sottostante si può visualizzare il ciclo scalato e convertito in rpm che è stato utilizzato nei test durante l'attività e compatibile con le prestazioni massime del motore.

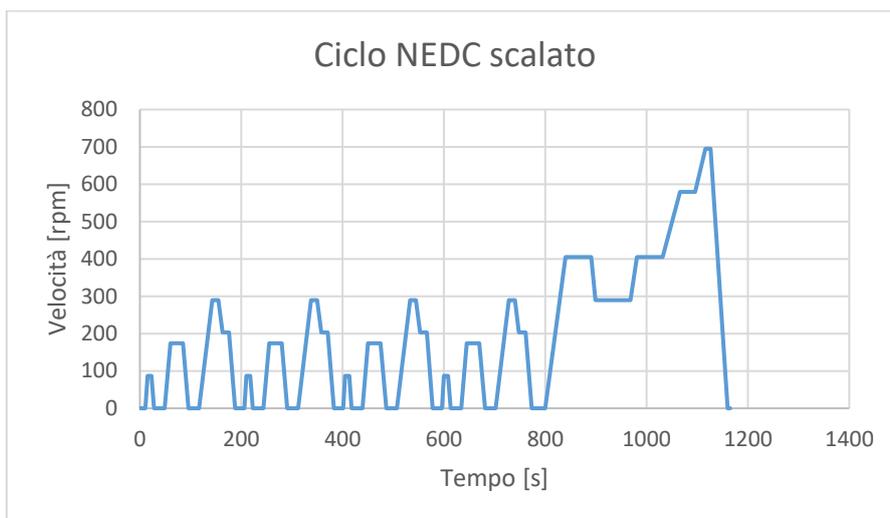


Figura 74. Ciclo NEDC scalato.

11.2.1 Test con ciclo guida NEDC

Il test con il ciclo guida di omologazione NEDC è stato reso possibile grazie alla possibilità di importare direttamente nel tool un profilo proveniente da un file Excel. Nella seguente sezione sono riportati i risultati di tale test in termini di velocità e corrente richiesta dal motore.

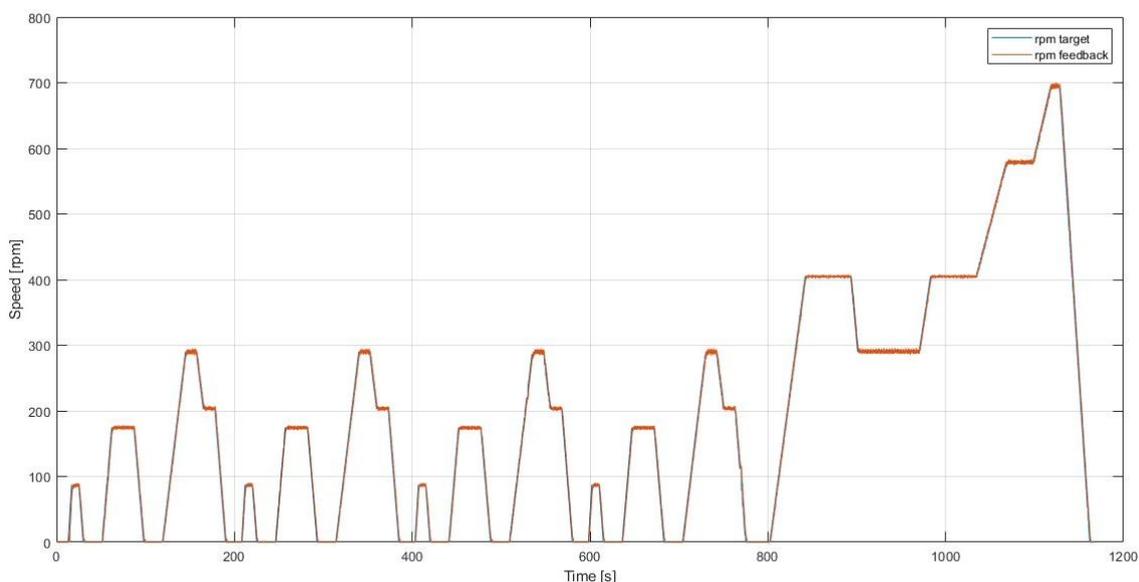


Figura 75. Risultati test con ciclo NEDC.

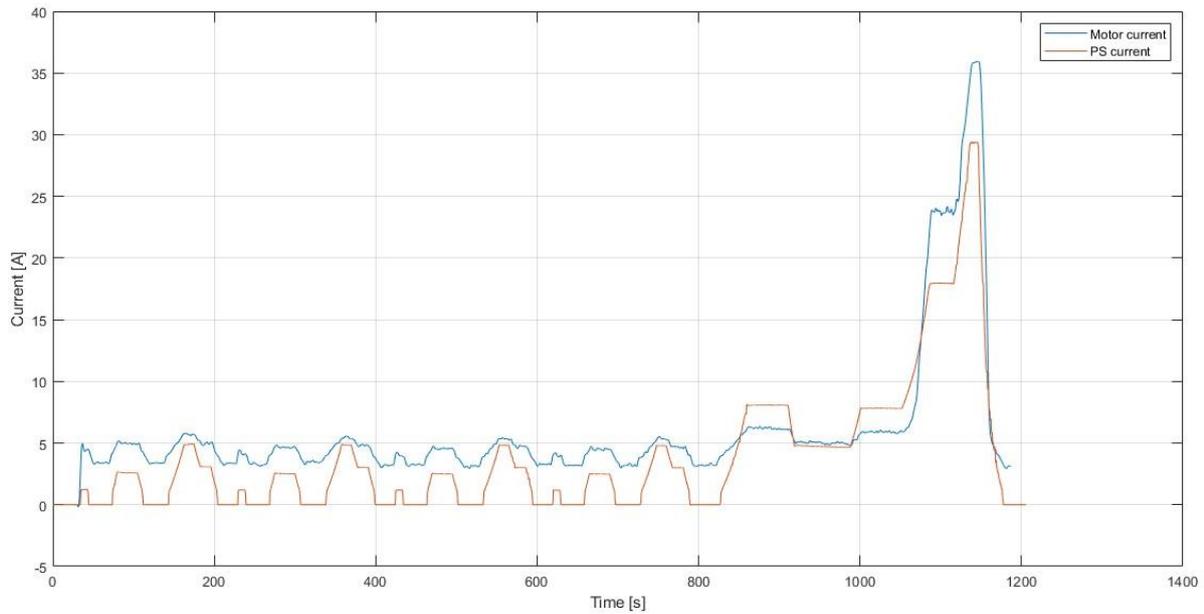


Figura 76. Corrente misurata dal motore e dall'alimentatore.

11.3 Ciclo guida WLTP

WLTP, ovvero Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure, è un ciclo guida che ha preso il posto, nel 2018, del predecessore NEDC (New European Driving Cycle) descritto nel capitolo precedente. Infatti questa nuova tipologia di test WLTP simula in laboratorio più fedelmente il comportamento della vettura su strade urbane, extraurbane e autostrade con relative emissioni e dati di consumi diversi da quelli rilevati dalla vecchia procedura NEDC.

La prova al banco in sintesi ha le seguenti caratteristiche innovative rispetto al precedente: dura 30 minuti, rispetto ai 20 minuti del NEDC, e prevede varie fasi di guida con accelerazione e decelerazione più brusche e velocità medie e massime più elevate per replicare meglio la guida quotidiana fatta di percorsi in città strade extraurbane e autostrade.

Riassumendo, i principali parametri dei test WLTP sono:

- Ciclo di test più rappresentativo del comportamento di marcia reale.
- Durata del ciclo portata a 30 minuti, 10 in più rispetto al sistema precedente NEDC.
- Distanza del ciclo aumentata a 23,25 chilometri, oltre il doppio della distanza precedente.
- Fasi di guida più dinamiche: 52% urbano e 48% extraurbano.
- Velocità media e massima aumentate: la velocità media è di 46,5 km/h (un incremento di 12,5 km/h), mentre la massima è cresciuta a 131 km/h. Il test WLTP si divide in quattro parti in funzione della velocità massima: Low (fino a 56,5 km/h), Medium (fino a 76,6 km/h), High (fino a 97,4 km/h) e Extra-high (fino a 131,3 km/h).

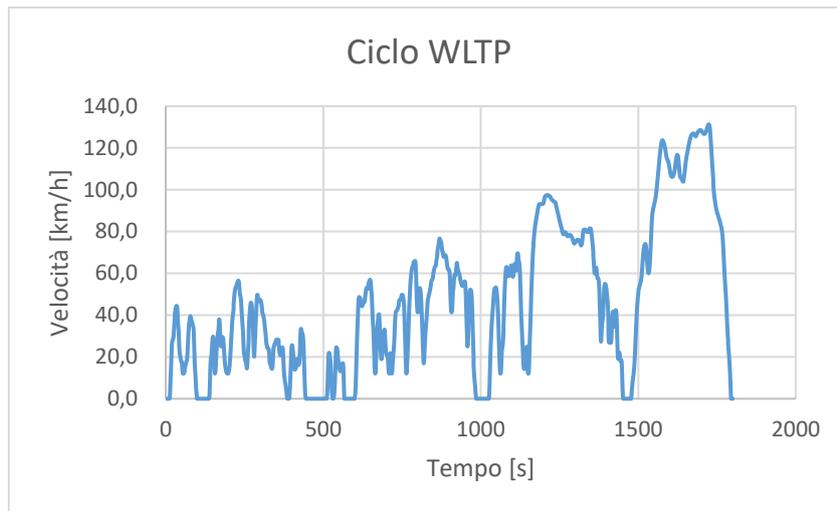


Figura 77. Ciclo WLTP.

Come nel ciclo precedente, anche in questo caso i valori di velocità massima da raggiungere non sono coerenti con le massime prestazioni del motore preso in esame, dunque è stata attuata anche in questo caso la scalatura dei valori di velocità a seconda di quella massima raggiungibile dal motore. Il ciclo WLTP scalato e convertito in rpm utilizzato durante i test è rappresentato nel grafico sottostante:

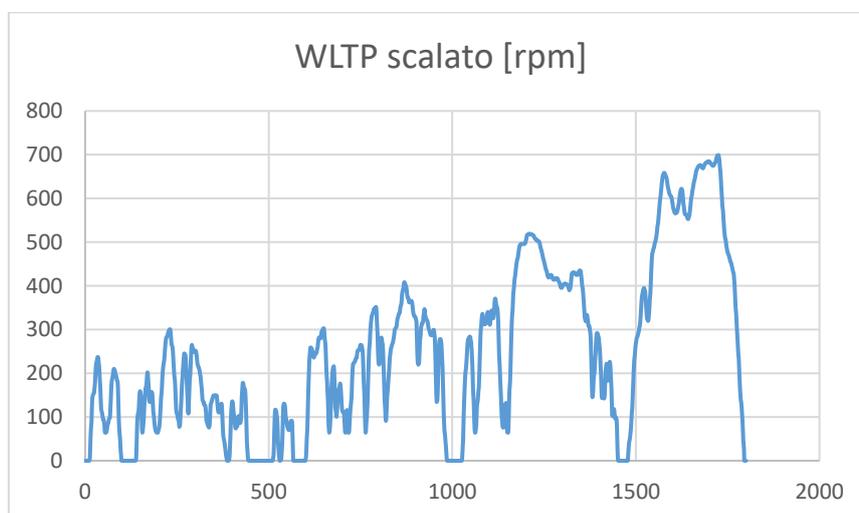


Figura 78. Ciclo WLTP scalato.

11.3.1 Test con ciclo guida WLTP

Sempre grazie alla funzionalità del tool creato di importazione di profili descritti in file Excel è stato possibile effettuare anche il ciclo omologativo più complesso WLTP. Dunque sono riportati nelle immagini seguenti i risultati di questo test in termini di velocità del motore e corrente assorbita.

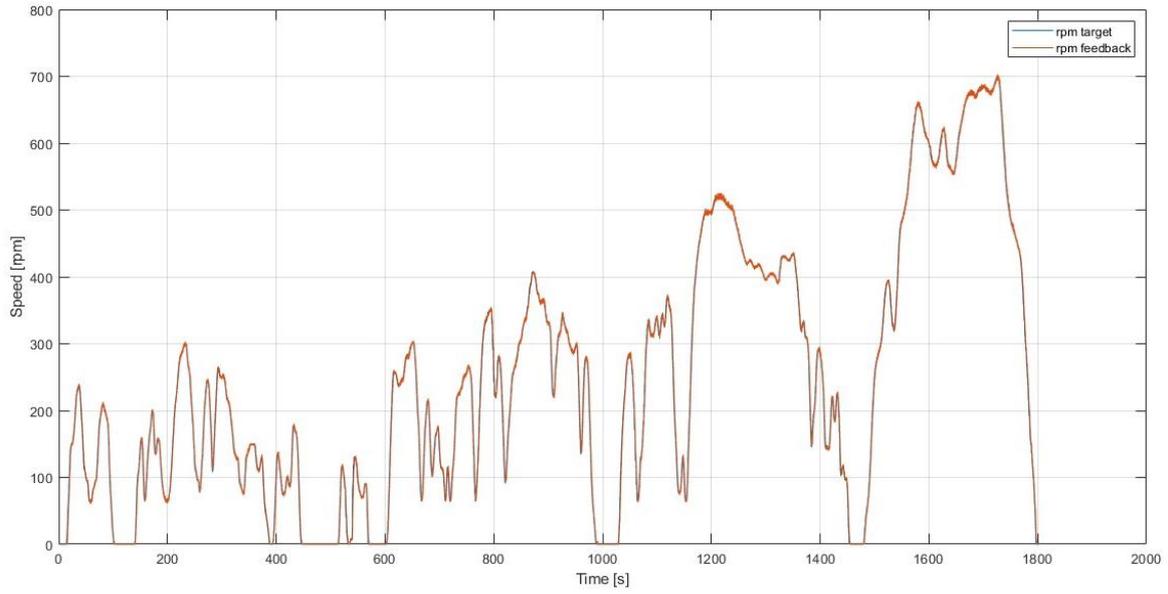


Figura 79. Risultati del test con ciclo WLTP.

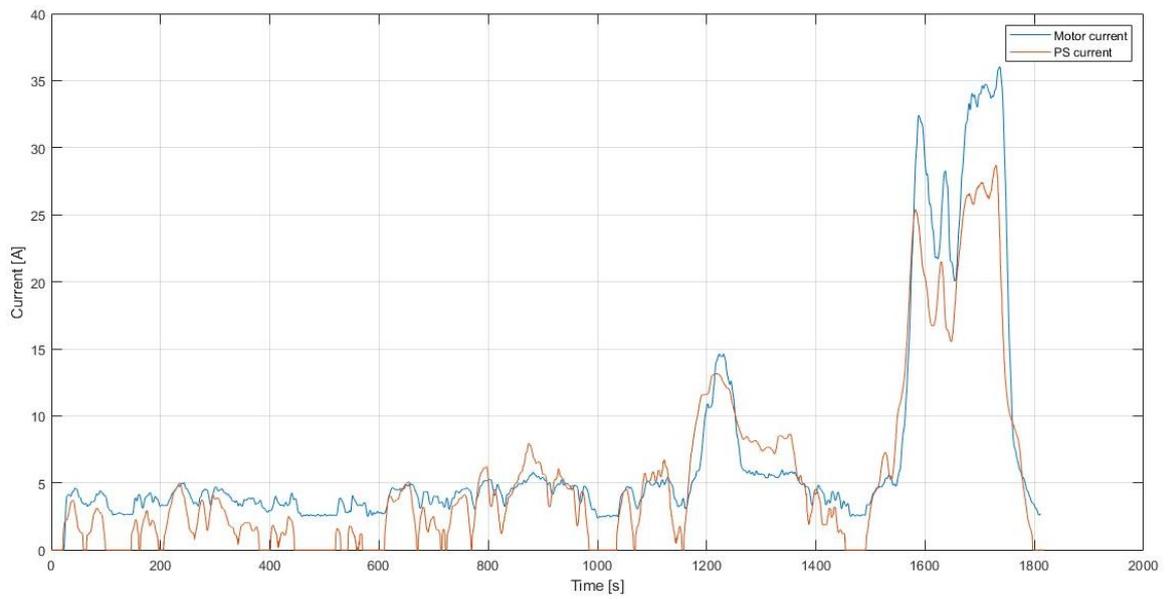


Figura 80. Corrente misurata dal motore e dall'alimentatore.

CAPITOLO 12: CONCLUSIONI

I test conseguiti hanno permesso di verificare il corretto funzionamento del tool progettato durante l'attività di tesi descritta, ed in aggiunta sono anche la dimostrazione del potenziale che questa applicazione può avere. Infatti si nota dai risultati che grazie a questo strumento si è in grado di inviare e fare eseguire al motore in maniera accurata una qualsiasi tipologia di profili di velocità anche delle più complesse e randomiche; inoltre il tool fornisce anche la possibilità di creare in maniera del tutto libera dei profili direttamente nell'interfaccia oppure importabili tramite file Excel fornendo quindi anche la totale versatilità che lo strumento è in grado di fornire ai fini di attività di testing di motori. A dimostrazione di ciò si può notare in figura 84 i risultati che si sono ottenuti in termini di confronto tra velocità target, ovvero quella di controllo inviata, e feedback, cioè quella reale del motore, durante il ciclo WLTP. Da questo grafico è possibile concludere che il Testing Motor Tool è in grado di inviare al motore dei profili di velocità molto complessi come quello preso in esame ed inoltre riesce a farli compiere in maniera molto accurata al motore, come si nota infatti la velocità target segue quella di controllo con grande precisione e senza ritardi.

Come risultati in termini del comportamento del motore testato che poi sarà reso responsabile della trazione di Emilia 4H si può concludere grazie ai test conseguiti che questo si comporta alla perfezione durante la comunicazione via CAN. Ovvero il motore risponde correttamente al controllo che vi si instaura tramite la comunicazione e riesce a ripercorrere con precisione e prontezza le curve di velocità che gli si impongono. Inoltre, in particolare grazie ai test tramite cicli omologativi NEDC e WLTP, è stato possibile testare la macchina anche tramite cicli reali dove è stata raggiunta la velocità massima dichiarata all'interno della sua scheda tecnica. Questo rende possibile concludere che il motore è del tutto capace di far percorrere al veicolo profili di velocità reali ed inoltre ha permesso verificare il conseguimento delle sue prestazioni massime dichiarate dai fornitori con esito positivo.

Inoltre, come è possibile notare dai risultati dei test, non c'è una corrispondenza precisa tra la corrente misurata dal motore e dall'alimentatore, ovvero i valori non sono uguali ed in particolare anche quando il motore è fermo e quindi non assorbe corrente, come si verifica nel caso di corrente misurata dall'alimentatore, il motore continua a percepire una corrente assorbita diversa da zero.

Questo comportamento può essere spiegato dalle seguenti considerazioni:

- La corrente misurata dall'alimentatore è una corrente media e quindi non rappresentativa delle oscillazioni che subisce a seconda della richiesta del motore soprattutto nei transitori, questo comportamento invece è possibile visualizzarlo nei grafici della corrente misurata dal motore. Quindi anche se l'alimentatore fornisce una corrente continua stabile, durante i periodi di carico variabile o transitorio, il motore potrebbe misurare piccole fluttuazioni o picchi di corrente continua che non sono visibili direttamente nell'output dell'alimentatore.
- Visto che l'alimentatore fornisce corrente continua a un inverter (che poi fornisce corrente alternata al motore), potrebbero esserci correnti di compensazione necessarie per alimentare i circuiti di controllo dell'inverter stesso. Quindi, il motore potrebbe rilevare una piccola corrente continua che serve a compensare le perdite nei circuiti elettronici dell'inverter.

- Il motore è un motore sincrono a magneti permanenti, e quindi la sua struttura interna, che include rotore e statore, può generare campi magnetici variabili. Questi campi possono interagire con altri componenti elettronici del sistema, come l'inverter o il circuito di controllo, che converte la corrente continua in corrente alternata. L'interazione tra questi campi magnetici può causare correnti parassite nei circuiti di controllo o nei sensori di corrente, che potrebbero causare questa differenza tra le misure.

In conclusione Il Testing Motor Tool è risultato uno strumento efficace e versatile da utilizzare durante l'attività di testing di motori elettrici. Inoltre; volgendo uno sguardo più lungimirante, sarà uno strumento valido per la caratterizzazione completa dei motori testati una volta aggiunto al setup la possibilità di imporre una coppia resistente al motore in modo da poter studiare le sue prestazioni anche in termini di coppia; visto che nelle applicazioni reali nei veicoli questi vengono controllati in coppia.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Parlamento europeo, Emissione di CO2 delle auto: i numeri e i dati, 09/12/2024, www.europarl.europa.eu
- [2] Rijul Gora, Riddhiman Biswas, Rahul Kumar Garg, Prof. Uma Nangia, Field Oriented Control of Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) Driven Electric Vehicle And Its Performance Analysis, 2021 IEEE 4th International Conference on Computing, Power and Communication Technologies
- [3] Anindra Mondal, Jihans Khan, Shruti Prins, Kumaravel S., Control of Dual Motore Test Bench for Performance Testing of PMSM for Traction Application, 2023 IEEE Silchar Subsection Conference
- [4] Texas Instrument TIDA-050063, High-Voltage Solid-State Relay Active Precharge Reference Design, Gennaio 2023, www.ti.com
- [5] Brian Munari, Andrew Schmeer, Sensata Technologies, How to design a precharge circuit for hybrid and electric vehicle applications, 12/11/2020, www.sensata.com
- [6] Murat Kubilay Ozguc, Eymen Ipek, Kadir Aras, Koray Erhan, Comprehensive Analysis of Pre-Charge Sequence in Automotive Battery System, Transaction on Environment and Electrical Engineering ISSN, 2020
- [7] Shane, Motori elettrici: Tipi, strutture e analisi delle prestazioni, 27/07/2023, www.machinemfg.com
- [8] Get Started with CAN Communication in MATLAB, www.mathworks.com
- [9] MathWorks Vehicle Network Toolbox Team, Use PEAK-System CAN hardware with MATLAB-Code Example, 25/09/2023, www.mathworks.com
- [10] Matlab Help Center, CAN Receive Workflow, www.mathworks.com
- [11] Matlab Help Center, CAN Transmit Workflow, www.mathworks.com
- [12] MST-Tutorial, Rete di comunicazione CAN, www.mst-tutorial.it
- [13] Appunti e slide del corso "Elementi di Conversione dell'Energia Elettrica LM"
- [14] European Environment Agency, Greenhouse gas emissions from transport in Europe, 31/10/2024, www.eea.europa.eu