



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA

Sistemi di accumulo e conversione dell'energia in auto elettrica

Relatore: Prof. MENEGHINI MATTEO

Laureando: BORTOLOTTO GIOVANNI

ANNO ACCADEMICO 2023 – 2024

Data di laurea 12/11/2024

INDICE

INTRODUZIONE

Capitolo 1: Sistemi di accumulo dell'energia

- 1.1 Disposizione del pacco batteria in auto elettrica
- 1.2 Batterie agli ioni di litio (Li-ion): Principio di funzionamento
- 1.3 Chimiche alternative per le batterie Li-ion
- 1.4 Batterie allo stato solido
- 1.5 Sistemi di gestione delle batterie (BMS)
- 1.6 Tensioni tipiche di batteria nei diversi tipi di auto (MHEV, HEV, BEV)

Capitolo 2: Sistemi di conversione dell'energia

- 2.1 Inverter nei veicoli elettrici
- 2.2 Convertitore DC-DC
- 2.3 Gestione frenata rigenerativa

Capitolo 3: Sfide tecnologiche

- 3.1 Autonomia e capacità delle batterie
- 3.2 Sistemi di ricarica
- 3.3 V2G (Vehicle-to-Grid) e ricarica bidirezionale
- 3.4 Degradazione delle batterie

Capitolo 4: Sostenibilità e impatti ambientali

- 4.1 Politiche europee in ambito di mobilità elettrica e Green Deal Europeo
- 4.2 Produzione e smaltimento delle batterie
- 4.3 Analisi del ciclo di vita (LCA) e valutazione emissione di CO₂

CONCLUSIONE

BIBLIOGRAFIA

INTRODUZIONE

L'evoluzione del settore automobilistico negli ultimi anni è stata caratterizzata da una crescente attenzione verso la sostenibilità ambientale e la riduzione delle emissioni di CO₂. In questo contesto, i veicoli elettrici stanno acquisendo un ruolo sempre più centrale, rappresentando una delle soluzioni più promettenti (secondo il progetto del Green Deal europeo) per affrontare le sfide del cambiamento climatico e della dipendenza dai combustibili fossili. La transizione verso la mobilità elettrica, tuttavia, richiede un'adeguata comprensione e ottimizzazione dei sistemi di accumulo e conversione dell'energia, che costituiscono il cuore tecnologico delle auto elettriche.

I sistemi di accumulo dell'energia, rappresentati principalmente dalle batterie, sono fondamentali per garantire l'autonomia e l'efficienza dei veicoli elettrici. Le batterie agli ioni di litio, per esempio, offrono una buona densità energetica e una durata relativamente lunga, ma richiedono anche una gestione termica e un monitoraggio costante per ottimizzarne le prestazioni e garantirne la sicurezza. La ricerca attuale si sta orientando verso l'ottimizzazione delle tecnologie esistenti e lo sviluppo di nuove soluzioni, come le batterie a stato solido, capaci di offrire maggiore densità energetica e sicurezza.

Parallelamente, i sistemi di conversione dell'energia, come gli inverter e i convertitori di potenza, sono essenziali per la gestione efficiente dell'energia immagazzinata nelle batterie e per la sua conversione in energia meccanica utilizzabile dal motore elettrico. Questi sistemi permettono di modulare la tensione e la corrente elettrica per adattarsi alle esigenze del veicolo, garantendo una gestione efficiente delle fasi di carica e scarica della batteria e ottimizzando le prestazioni complessive dell'auto.

La comprensione approfondita dei sistemi di accumulo e conversione dell'energia è quindi cruciale per migliorare l'efficienza, la durata e la sostenibilità delle auto elettriche. Questa tesi si propone di analizzare le tecnologie attualmente in uso, le loro potenzialità e le sfide legate alla loro implementazione. Verranno inoltre esaminati le principali tendenze di ricerca e sviluppo in questo ambito, con particolare attenzione alle innovazioni che potrebbero rivoluzionare il futuro della mobilità elettrica, contribuendo a un sistema di trasporto più ecologico e sostenibile.

Capitolo 1

Sistemi di Accumulo dell'Energia

I sistemi di accumulo dell'energia sono una componente chiave nei veicoli elettrici (EV), responsabili di immagazzinare e fornire l'energia necessaria per alimentare il motore e i vari sistemi del veicolo. Questi sistemi assicurano che l'energia sia disponibile quando richiesta e che venga gestita in modo efficiente per ottimizzare le prestazioni e l'autonomia del veicolo.

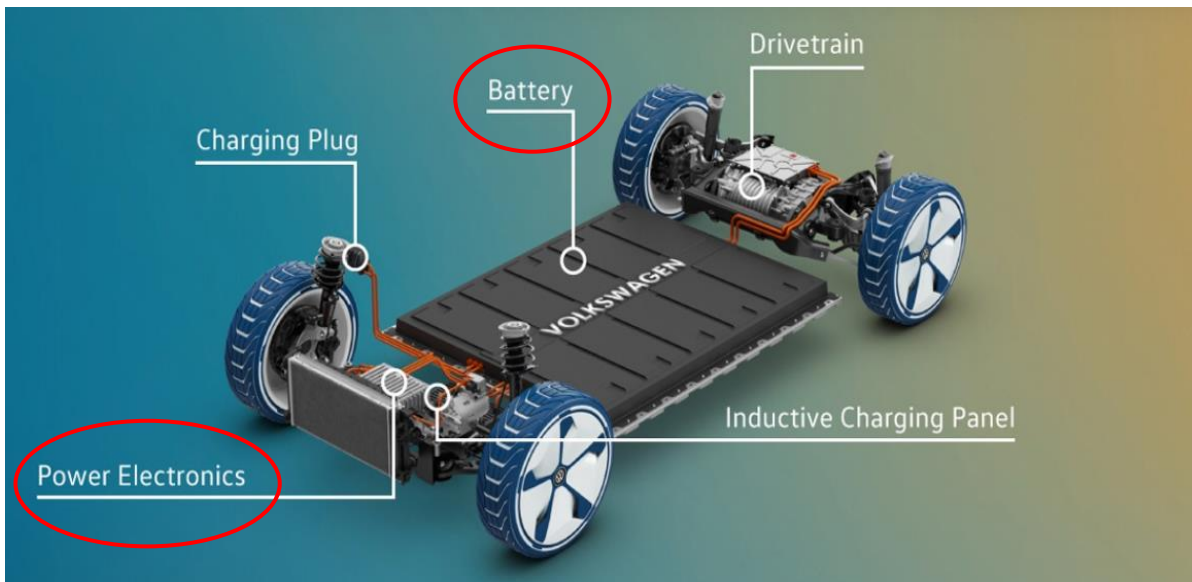
1.1 Disposizione del pacco batterie in un'auto elettrica

Nelle auto elettriche, le batterie sono tipicamente disposte in un pacchetto modulare, che consiste in più celle e moduli (nel pacco batterie ci sono diversi moduli, ciascuno dei quali contiene diverse celle di batteria). Questo pacchetto di batterie viene progettato in modo da massimizzare lo spazio disponibile, garantendo una distribuzione uniforme del peso dell'auto in modo da ottimizzare l'efficienza e la sicurezza del mezzo.

La maggior parte delle auto elettriche utilizza uno schema di posizionamento orizzontale, in cui il pacco batterie è collocato sotto il pianale, tra gli assi anteriore e posteriore. Questo approccio offre diversi vantaggi:

- **Centro di gravità basso:** Posizionando le batterie in basso si abbassa il centro di gravità del veicolo, migliorando la stabilità e la maneggevolezza.
- **Spazio ottimizzato:** Questo permette di sfruttare al massimo lo spazio interno per passeggeri e bagagli.
- **Protezione:** La batteria è protetta in caso di impatti frontali o posteriori, riducendo il rischio di danni.

Di seguito è riportata un'immagine della disposizione delle batterie in un'auto elettrica (in questo caso VOLKSWAGEN), in cui sono evidenziati i due elementi principali che questa tesi ha lo scopo di analizzare [1]:



1.2 Batterie agli ioni di litio (Li-ion)

Struttura cella di batteria

Le batterie agli ioni Litio sono il tipo di batteria ricaricabile più utilizzata, non solo per le auto elettriche ma anche in innumerevoli altre applicazioni. Vediamo di capirne il motivo attraverso la descrizione della sua struttura e del suo funzionamento.

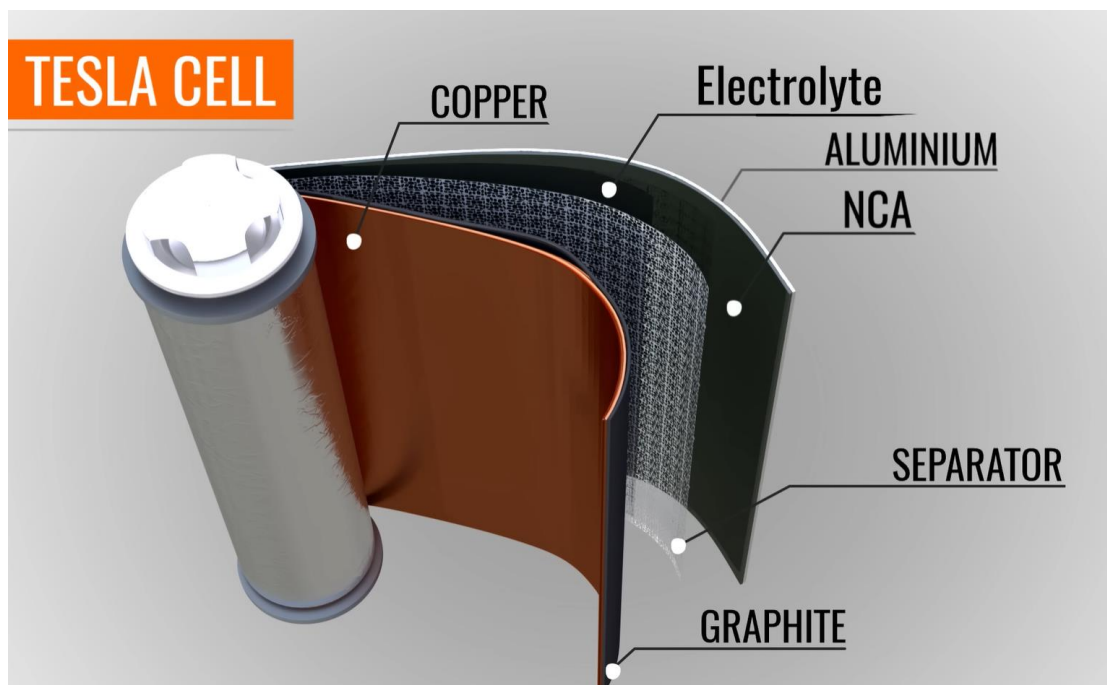
Il litio è un elemento caratterizzato da un alto potenziale elettrochimico, ciò significa che è molto reattivo e ha una forte tendenza a cedere il suo elettrone (unico) di valenza, viene per questo motivo utilizzato nelle celle di batteria agli ioni di litio.

Una cella agli ioni di Litio è composta da diversi componenti chiave [2]:

- **Anodo:** è l'elettrodo negativo ed è solitamente fatto di grafite, un materiale che può immagazzinare ioni di litio
- **Catodo:** è l'elettrodo positivo ed è generalmente fatto di ossido di metallo
- **Elettrolita:** solitamente un liquido composto da Sali di litio disciolti in solventi organici, ha la funzione di consentire il movimento degli ioni di litio attraverso di esso, e di bloccare invece il passaggio degli elettroni
- **Separatore:** è un sottile strato di materiale poroso (spesso in polietilene o polipropilene), che impedisce il contatto diretto tra anodo e catodo (che causerebbe un cortocircuito, che potrebbe far incendiare ed esplodere la batteria), ma permette il passaggio degli ioni di litio attraverso i suoi pori

- **Collettori di corrente:** sono strati conduttivi che si trovano sull'anodo (tipicamente realizzato in rame) e sul catodo (tipicamente realizzato in alluminio), e servono per facilitare il trasferimento di elettroni tra cella e circuito esterno
- **Rivestimento:** in genere una custodia metallica o un materiale plastico resistente, che protegge la cella dagli elementi esterni e dalle condizioni ambientali

Di seguito è riportata un'immagine relativa a una cella di batteria Tesla [2]:

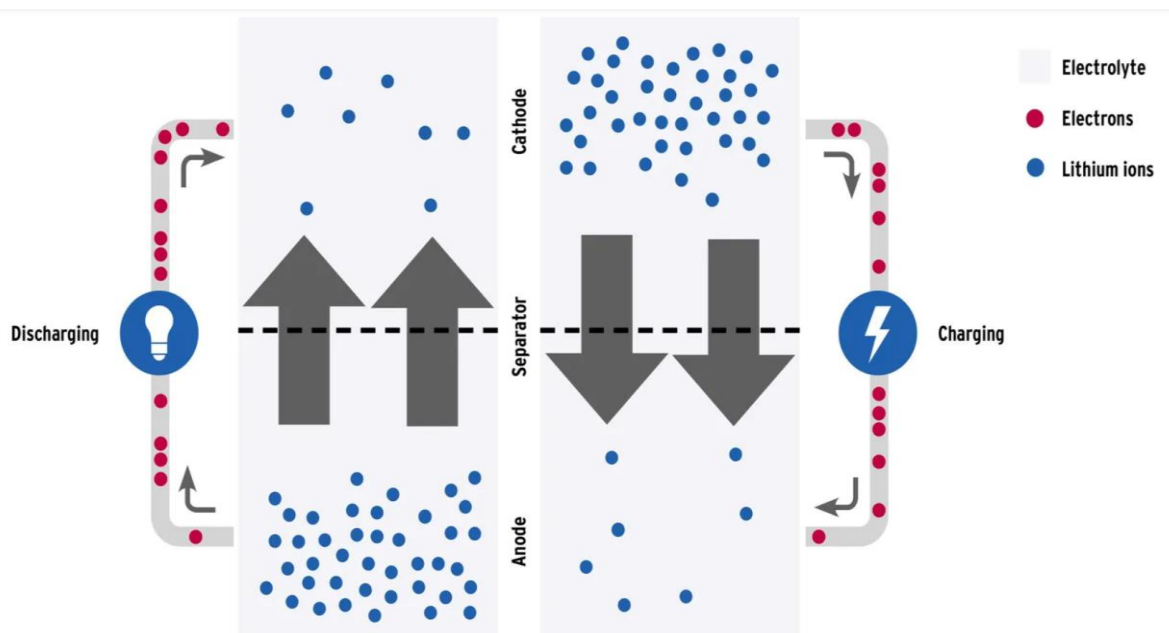


Funzionamento cella di batteria (carica e scarica)

Quando colleghiamo una fonte di alimentazione ad una cella di batteria agli ioni di litio, il polo positivo (della fonte di alimentazione) attirerà gli elettroni, i quali si staccheranno dagli atomi di litio dell'ossido di metallo. Questi elettroni fluiscono attraverso il circuito esterno, perché non possono oltrepassare l'elettrolita e raggiungono lo strato di grafite (anodo). Nel frattempo, gli ioni di litio caricati positivamente (hanno perso l'elettrone) verranno attirati verso l'anodo (caricato negativamente) e fluiranno attraverso l'elettrolita, raggiungendo anch'essi lo spazio dello strato di grafite rimanendovi intrappolati. Una volta che tutti gli atomi di litio raggiungono lo strato di grafite la cella è completamente carica e possiamo dire di aver ottenuto il distacco degli ioni di litio e degli elettroni dall'ossido metallico.

Se scollegiamo la fonte di alimentazione e colleghiamo un carico, gli ioni di litio torneranno dall'ossido metallico (catodo) attraversando l'elettrolita, mentre gli elettroni fluiranno attraverso il carico, ottenendo in questo modo una corrente elettrica (flusso di elettroni) attraverso il carico. Quando tutti gli ioni di litio e gli elettroni raggiungeranno l'ossido di metallo la batteria sarà completamente scarica.

Una cella di batteria Tesla standard ha una tensione compresa tra 3-4.2 V ed è lunga 65 mm. Di seguito è riportata un'immagine che illustra in maniera visiva come si comporta la cella durante il funzionamento di carica e scarica [2]:



STRATO SEI (Solid electrolyte interface)

C'è un fenomeno particolare che si verifica all'interno delle celle di litio durante la sua primissima carica. Gli elettroni nello strato di grafite rappresentano un problema perché, se essi entrano in contatto con l'elettrolita, quest'ultimo verrà degradato. Tuttavia, gli elettroni non verranno mai in contatto con l'elettrolita a causa della scoperta accidentale riguardante l'interfaccia solida dell'elettrolita (SEI, solid electrolyte interface) [2].

Infatti, se carichiamo per la prima volta la cella di batteria, come già spiegato, gli ioni di litio si muovono attraverso l'elettrolita. Una volta attraversata le molecole di solvente ricoprono gli ioni di litio e quando raggiungono la grafite, gli ioni di litio insieme alle molecole del solvente reagiscono con la grafite e formano uno strato chiamato SEI.

La generazione di questo strato ha l'enorme utilità di impedire il contatto diretto tra gli elettroni e l'elettrolita, preservando così l'elettrolita dalla degradazione. Tale processo (di

creazione dello strato SEI) consumerà il 5% del litio, il restante 95% del litio contribuisce al funzionamento principale della batteria.

Lo strato SEI è stata una scoperta casuale, ma dopo oltre due decenni di ricerca e sviluppo, gli scienziati hanno ottimizzato lo spessore e la chimica dello strato SEI per le massime prestazioni delle celle.

Caratteristiche e vantaggi principali

- **Alta densità energetica:** Le batterie Li-ion possono immagazzinare una grande quantità di energia per unità di peso, rendendole ideali per dispositivi portatili e veicoli elettrici.
- **Bassa autoscarica:** Perdono lentamente la carica quando non in uso, mantenendo una buona capacità anche dopo lunghi periodi di inattività.
- **Lunga durata:** Possono gestire centinaia di cicli di carica e scarica prima di perdere significativamente capacità (sono in grado di raggiungere oltre 3000 cicli di carica/scarica).
- **Efficienza:** Hanno un'elevata efficienza di carica e scarica, con una minima perdita di energia.
- **Sicurezza:** Nonostante i rischi di surriscaldamento e incendi, le moderne batterie Li-ion sono progettate con sistemi di gestione della batteria (BMS) per prevenire malfunzionamenti.

Tutte caratteristiche molto interessanti, grazie alle quali si prevede che il mercato delle batterie agli ioni di litio diventerà un'industria da oltre 100 miliardi di euro entro il prossimo decennio.

1.3 Chimiche alternative per le batterie Li-ion

- Le batterie **NCM** (Nichel-Cobalto-Manganese) e **LFP** (Litio-Ferro-Fosfato) sono due tipi comuni di batterie agli ioni di litio, ognuna con determinati vantaggi legati alla chimica dei materiali del catodo. I principali vantaggi delle batterie NCM sono: alta densità energetica, prestazioni elevate, maggiore autonomia, compattezza, notevole flessibilità chimica. I principali vantaggi delle batterie LFP sono: maggiore sicurezza,

lunga durata (fino a 3000 e 5000 cicli di carica/scarica), basso costo, elevata resistenza termica, grande sostenibilità.

- Le **batterie Li-S** utilizzano un anodo di litio metallico e un catodo di zolfo. Offrono una densità energetica molto elevata, potenzialmente 2-5 volte superiore rispetto alle batterie convenzionali. Un altro vantaggio è l'uso di materiali abbondanti ed economici come lo zolfo, che rende la produzione meno costosa e più sostenibile. Tuttavia, le batterie Li-S hanno una durata limitata, con circa 200-300 cicli di carica/scarica prima di degradarsi. Inoltre, soffrono dell'effetto polisolfuro, dove i composti di litio si dissolvono nell'elettrolita, riducendo l'efficienza della batteria.
- Le **batterie Li-Air** utilizzano un anodo di litio metallico e l'ossigeno atmosferico funge da catodo. Questa tecnologia promette una densità energetica estremamente elevata, potenzialmente fino a 10 volte maggiore rispetto alle batterie agli ioni di litio, avvicinandosi all'energia per unità di peso della benzina. Utilizzando ossigeno esterno, le batterie risultano più leggere. Tuttavia, la loro durata è attualmente molto limitata, con problemi di stabilità e sensibilità all'umidità e ai contaminanti presenti nell'aria. Nonostante il loro potenziale, le batterie Li-Air sono ancora in fase sperimentale e presentano sfide tecniche significative.

1.4 Batterie allo stato solido

Le batterie allo stato solido (Solid-State Batteries) sono una tecnologia emergente che promette di superare molte delle limitazioni delle batterie agli ioni di litio tradizionali [3].

Struttura delle Batterie allo Stato Solido

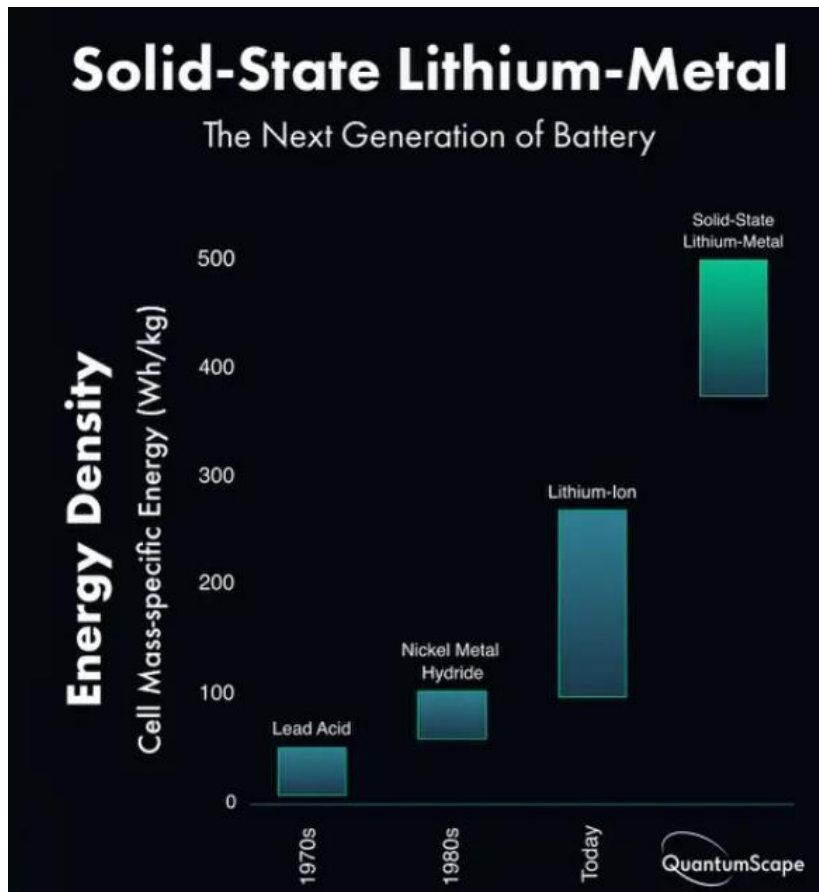
- **Anodo:** Solitamente composto di litio metallico o un altro materiale adatto per l'immagazzinamento degli ioni di litio.
- **Catodo:** Può essere realizzato con vari materiali, tra cui ossidi di litio o fosfati.
- **Elettrolita Solido:** A differenza delle batterie agli ioni di litio tradizionali che utilizzano un elettrolita liquido, le batterie allo stato solido impiegano un elettrolita solido, che può essere un ceramico, un polimero o un altro materiale solido conduttivo.
- **Separatore:** L'elettrolita solido funge anche da separatore, impedendo il contatto diretto tra l'anodo e il catodo.

VANTAGGI

Un notevole beneficio è il miglioramento della sicurezza, poiché l'elettrolita solido riduce il rischio di incendi e perdite, rendendo queste batterie molto più sicure. Inoltre, le batterie allo stato solido possono immagazzinare una quantità maggiore di energia per unità di peso o volume, il che le rende particolarmente adatte per applicazioni che richiedono alta densità energetica, come i veicoli elettrici e i dispositivi portatili. La loro durata è superiore rispetto alle batterie convenzionali, grazie alla capacità di sopportare un numero maggiore di cicli di carica e scarica senza deteriorarsi rapidamente. Anche la resistenza alle alte temperature è migliorata, consentendo alle batterie di mantenere buone prestazioni anche in condizioni di calore estremo.

SVANTAGGI

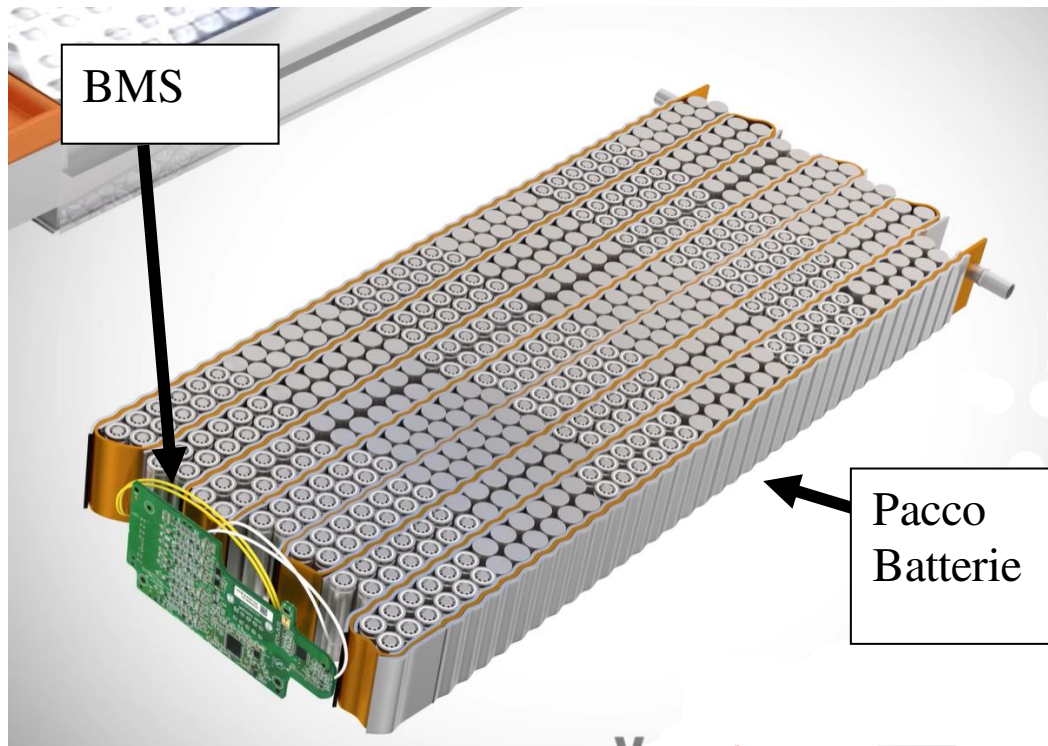
Queste batterie presentano anche alcuni svantaggi. I costi di produzione sono attualmente elevati, a causa delle sfide legate alla realizzazione di elettroliti solidi e al processo di assemblaggio. Questo alto costo può limitare la loro diffusione sul mercato. Inoltre, la produzione su larga scala di batterie allo stato solido è complessa e comporta difficoltà nel garantire la qualità e la consistenza dei materiali solidi utilizzati. Alcune tecnologie necessarie per garantire una buona conduttività ionica e un'interfaccia efficace con gli elettrodi sono ancora in fase di sviluppo. Pertanto, sebbene le batterie allo stato solido offrano vantaggi significativi in termini di sicurezza e prestazioni, devono affrontare sfide legate ai costi e alla scalabilità prima di poter essere adottate su larga scala.



1.5 Sistemi di gestione delle batterie (BMS)

Il Battery Management System (BMS) è un componente fondamentale nei sistemi di accumulo energetico, come le batterie agli ioni di litio, per garantire un funzionamento sicuro, efficiente e duraturo. Nei veicoli elettrici o ibridi, per raggiungere le tensioni richieste (centinaia di volt), vengono connesse in serie numerose celle al litio; ciò implica che il circuito di gestione della batteria debba occuparsi del monitoraggio a più livelli, ovvero dalla singola cella all'intero pacco.

Di seguito è riportata un'immagine che mostra com'è la disposizione tra BMS e pacco batterie in una generica auto elettrica [2]:



Funzionalità di un BMS

Il BMS tiene traccia di diversi parametri per il **monitoraggio** dello stato delle batterie dell'auto elettrica al fine di proteggerle in caso di problemi, rilevare eventuali anomalie e prevenire malfunzionamenti. Ecco alcuni dei parametri misurati:

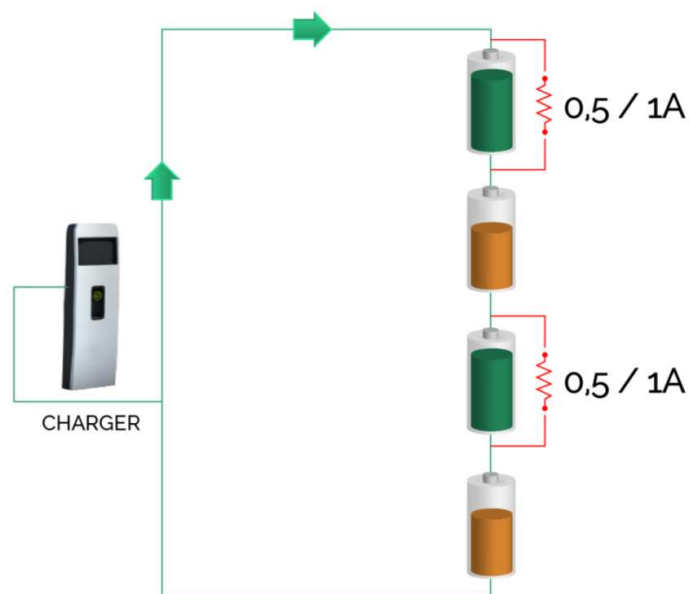
- **State of charge (SOC):** La quantità di carica che è presente nella batteria, espressa in percentuale. È fondamentale per determinare quanta energia è disponibile e fornisce dunque un'idea sull'autonomia residua.
- **State of Health (SOH):** Indica la salute della batteria rispetto al suo stato originale, ossia quanto la batteria si è degradata nel tempo.
- **Tensione:** Il BMS monitora la tensione di ogni cella della batteria per evitare sovraccarichi o scariche profonde, che possono danneggiare la batteria.
- **Corrente:** Misura la corrente di carica e scarica per assicurare che le celle non siano sovraccaricate o sovrascaricate. Se la corrente in carica o scarica supera un livello sicuro, il BMS può interrompere il flusso di corrente per proteggere le celle. Inoltre, il BMS può rilevare e interrompere un corto circuito per prevenire danni alle celle o ai componenti elettronici.

- **Temperatura:** Monitora la temperatura delle celle per evitare il surriscaldamento, che potrebbe portare a condizioni di pericolo come incendi o esplosioni. Se la temperatura delle celle supera un certo limite, il BMS può ridurre o interrompere la carica o scarica per evitare il surriscaldamento.

Una delle funzionalità più importanti del BMS è sicuramente il **bilanciamento**. In un pacco batteria composto da più celle in serie o in parallelo, è comune che alcune celle si carichino o scarichino a ritmi diversi a causa di piccole differenze di capacità, resistenza interna o condizioni operative. Queste differenze, se non controllate, possono portare a squilibri che riducono la capacità totale utilizzabile e la durata della batteria.

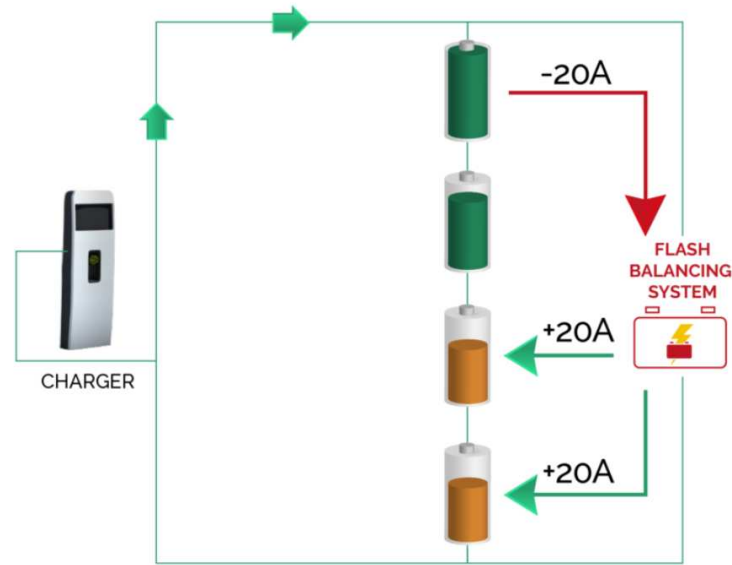
Vengono a tale scopo utilizzate due tecniche di bilanciamento:

- **Bilanciamento passivo:** Nel bilanciamento passivo, l'energia in eccesso delle celle che hanno una tensione più alta (cioè, che sono più cariche) viene dissipata sotto forma di calore tramite resistori. Il BMS monitora la tensione delle singole celle e, quando rileva che una cella ha una carica maggiore rispetto alle altre, collega un resistore in parallelo a quella cella, dissipando il suo eccesso di energia fino a raggiungere lo stesso livello delle altre celle. Il bilanciamento passivo ha costi bassi ma è lento e poco efficiente [4].



Esempio di rete con bilanciamento passivo

- **Bilanciamento attivo:** La carica in eccesso delle celle viene distribuita tra di esse durante i cicli di carica e scarica (la carica viene trasferita dalle celle più cariche a quelle meno cariche). Così facendo, viene prolungata l'autonomia in quanto la carica complessiva del pacco batteria è aumentata. Inoltre, a differenza del bilanciamento passivo, sia il calore generato durante l'operazione di bilanciamento che il tempo di ricarica vengono ridotti, mentre il costo è decisamente più alto [4].



Esempio di bilanciamento attivo con Flash Balancing System, il quale sfrutta una corrente molto più alta rispetto al bilanciamento passivo (quindi tempi minori)

Altra funzionalità assolutamente indispensabile del BMS è la **comunicazione**, che permette ad esso di interfacciarsi con altri sistemi di controllo, sia interni che esterni al veicolo, e consentendo lo scambio di dati (per esempio dei vari parametri di controllo delle batterie) utilizzando diversi protocolli di comunicazione.

Il protocollo di comunicazione più comunemente utilizzato nei veicoli elettrici per far comunicare il BMS con gli altri sistemi è il CAN Bus (Controller Area Network). Esso è stato sviluppato per gestire in modo affidabile la comunicazione tra le varie centraline elettroniche di un veicolo, permettendo di scambiare informazioni in modo sicuro, rapido e con priorità dei messaggi di sicurezza.

Caratteristiche CAN Bus

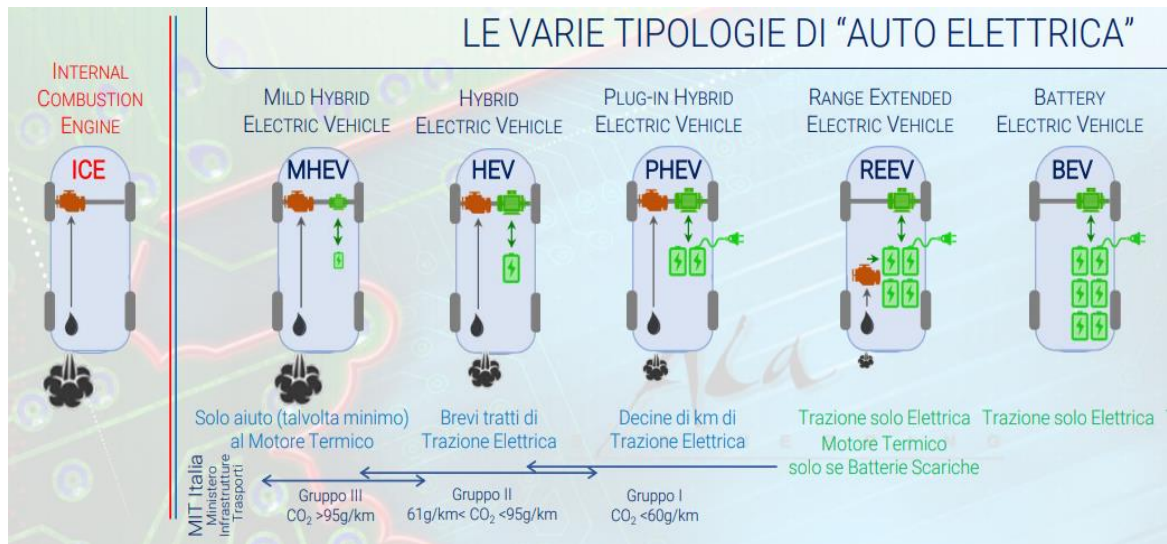
- Rete seriale ad alta affidabilità.
- Resistente alle interferenze elettromagnetiche (fondamentale in un veicolo elettrico).
- Prioritizzazione dei messaggi: i messaggi più critici, come quelli relativi alla sicurezza o al monitoraggio dello stato della batteria, hanno la precedenza.
- Utilizzato per la comunicazione tra BMS, ECU (electronic control unit), inverter, caricatore e altri sistemi.

1.6 Tensioni tipiche di batteria nei diversi tipi di auto (MHEV, HEV, BEV)

Informazioni particolarmente interessanti sono legate alle tensioni tipiche delle batterie nelle diverse tipologie di auto elettriche, le quali variano a seconda del tipo di veicolo ovviamente, e dalla configurazione del sistema elettrico:

- BEV (Battery Electric Vehicle): I veicoli elettrici a batteria, operano generalmente a tensioni comprese tra 350 V e 800 V [5].
- HEV (Hybrid Electric Vehicle): I veicoli ibridi, che combinano un motore a combustione interna con un motore elettrico, utilizzano sistemi ad alta tensione, ma inferiori rispetto a quelli dei BEV. Le tensioni dei sistemi ibridi variano generalmente tra 100 V e 300 V [6]. Questo range è sufficiente per supportare il funzionamento dei motori elettrici che assistono l'ICE (Internal Combustion Engine) durante l'accelerazione e per la ricarica rigenerativa.
- MHEV (Mild Hybrid Electric Vehicle): Gli MHEV utilizzano un motore elettrico per supportare brevemente il motore a combustione interna, ma non possono funzionare esclusivamente con la propulsione elettrica. Generalmente, tali veicoli usano una tensione da 48 V [5] [6], che è sufficiente per ridurre il consumo di carburante e le emissioni, permettendo funzioni come lo start/stop automatico e il recupero dell'energia in frenata.

Di seguito è riportata un'immagine che mostra a grandi linee come è strutturata la fonte di energia delle varie tipologie di auto elettrica [7]:



Capitolo 2

Sistemi di Conversione dell'Energia

Nei veicoli elettrici (EV), i sistemi di conversione dell'energia sono cruciali per gestire e ottimizzare il flusso di energia tra la batteria e i vari componenti del veicolo. Questi sistemi assicurano che l'energia immagazzinata nella batteria venga utilizzata in modo efficace per alimentare il motore elettrico e altri sistemi del veicolo, garantendo prestazioni ottimali e una gestione efficiente della batteria.

2.1 Inverter nei veicoli elettrici

Gli inverter nei veicoli elettrici sono dei dispositivi molto importanti per quanto riguarda il funzionamento del motore elettrico. Il loro obiettivo principale è quella di convertire la corrente continua (DC) che proviene dalla batteria, in corrente alternata (AC), necessaria per far funzionare il motore che ha bisogno della corrente alternata per poter eseguire il suo compito, con ampiezze e frequenze che possono essere opportunamente controllate. Inoltre, in un'auto elettrica, la maggior parte dei motori è trifase, il che significa che l'inverter deve generare corrente alternata trifase.

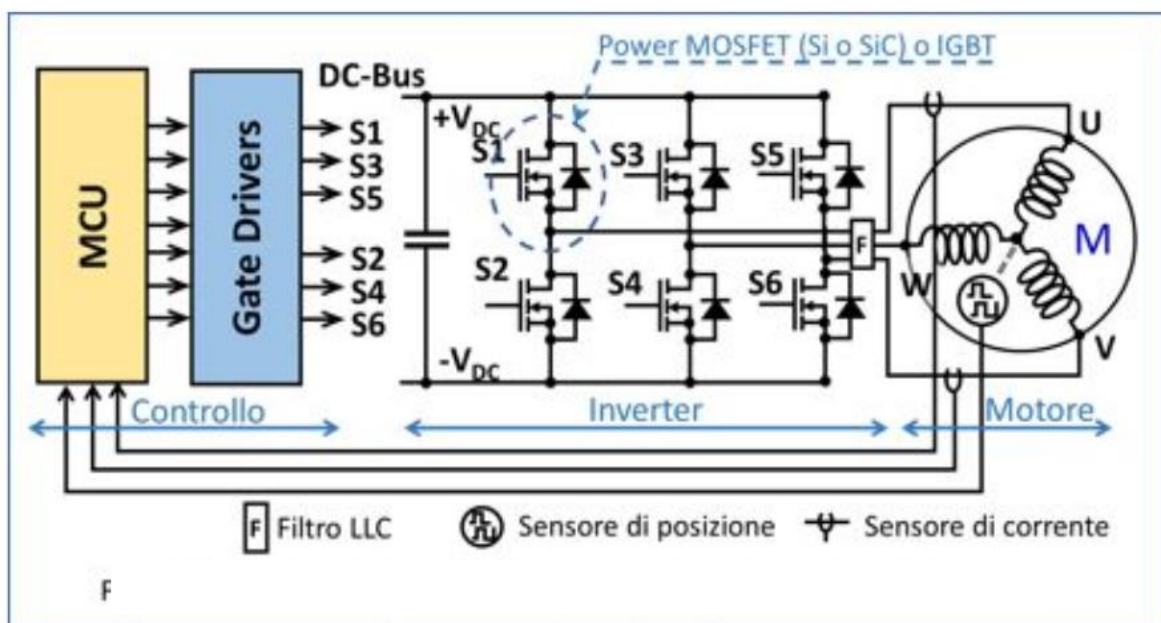
Struttura inverter

L'inverter è costituito da due blocchi principali: l'inverter stesso e l'unità di controllo [8].

L'inverter è formato tipicamente da sei (o di più nelle architetture più complesse) interruttori di commutazione, ognuna delle tre fasi del motore (U, V, W) è pilotata da una coppia di interruttori. L'ingresso dell'inverter è una tensione continua che si mantiene praticamente costante a un valore V_{DC} attraverso un condensatore di livellamento. Tra il motore e gli interruttori è presente un filtro (passa basso, per limitare il contenuto armonico dei segnali generati tramite gli interruttori)

L'unità di controllo è rappresentata da un microcontrollore (MCU), che partendo dalle informazioni ricevute dai sensori di corrente (su due fasi del motore) e da un sensore di posizione, determina le sequenze di accensione e spegnimento dei dispositivi di potenza controllando i segnali di pilotaggio dei gate dei sei interruttori.

In altre parole, la centralina monitora i segnali provenienti dai sensori del veicolo, come la posizione del pedale dell'acceleratore, la velocità del veicolo, lo stato della batteria, e in base a questi dati, l'unità di controllo elettronica gestisce il funzionamento dell'inverter per fornire potenza ottimale al motore.



Schema di principio di un inverter che pilota un motore trifase ad induzione

Tipologie interruttori in un inverter e relativi vantaggi

- Gli IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) possono operare efficientemente ad elevate tensioni (tipicamente tra 400 V e 800 V), ma hanno una bassa frequenza di commutazione (tipicamente sotto i 20 kHz). Sono inoltre capaci di gestire sovratensioni e sovracorrenti senza danneggiarsi esageratamente e godono di migliori prestazioni ad alte correnti.
- I MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor-Field-Effect) operano a tensioni più basse (tipicamente inferiore ai 400 V), ma raggiungono elevate frequenze di commutazione (centinaia di kHz), senza eccessive perdite di commutazione, il che li rende utili in applicazioni in cui è importante una risposta rapida o un controllo preciso della velocità. Inoltre, i Mosfet richiedono meno corrente per attivare il gate, rendendoli quindi più facili da pilotare.

Tecniche di modulazione di un inverter

L'obiettivo dell'inverter è quello di fornire al motore una terna di tensioni alternate con andamento sinusoidale sfasate tra di loro di 120° , partendo da sorgente costante. Questo può essere ottenuto pilotando in modo adeguato i sei interruttori di commutazione attraverso algoritmi che rendano le forme d'onda delle tensioni sul motore il più simile possibile ad una onda sinusoidale.

Nelle auto elettriche le tecniche di pilotaggio degli inverter (e quindi degli interruttori di cui è composto) più tipicamente utilizzate sono:

- Modulazione a larghezza d'impulso sinusoidale (SPWM) [8].
- Modulazione vettoriale dello spazio (SVPWM): è più prestante della SPWM, perché invece di confrontare singole sinusoidi con un'onda triangolare, rappresenta le tre fasi del motore come un vettore rotante nello spazio tridimensionale, ottimizzando la gestione della tensione applicata. I suoi vantaggi sono una maggiore efficienza, una minore distorsione armonica e un miglior controllo della coppia e della velocità del motore.

Modulazione a larghezza d'impulso sinusoidale (SPWM)

Procediamo ora alla descrizione della tecnica SPWM, partendo dalle seguenti assunzioni e facendo riferimento allo schema di principio dell'inverter:

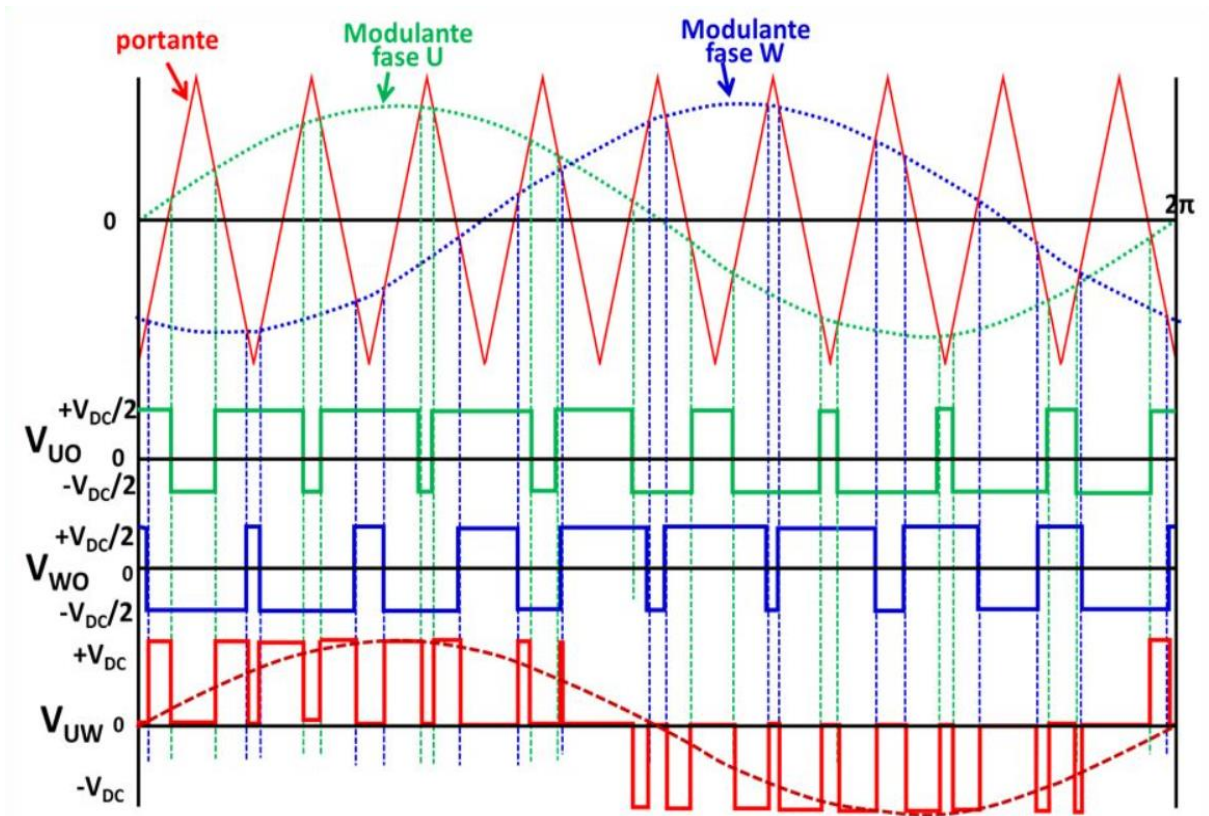
- La tensione del bus in continua rimane costante al variare del carico
- Gli interruttori sono ideali, cioè, hanno caduta di tensione nulla e tempo di commutazione nullo.
- La tensione DC è supposta essere divisa in due metà con il punto centrale collegato al punto O (punto di collegamento delle tre fasi del motore).
- Definiamo le tensioni di fase V_{UO} , V_{VO} , e V_{WO} misurate rispetto al centro stella O e le tensioni concatenate V_{UW} , V_{WV} , e V_{VU} .

Nel PWM sinusoidale il segnale di comando degli interruttori di potenza si ottiene confrontando il segnale modulante con un'onda triangolare, detta onda portante, che ha frequenza almeno di un ordine di grandezza superiore rispetto a quella della modulante.

Negli inverter trifase a due livelli c'è bisogno di tre segnali sinusoidali, uno per ogni fase pilotata (U, V, W), sfasati tra di loro di 120° . Il grafico sottostante mostra il segnale portante triangolare (che ha la frequenza di commutazione degli interruttori), e due dei tre segnali modulanti (relativo a fase U e fase W). Quando la modulante U incrocia la tensione portante avviene la commutazione dell'interruttore S1 (generando impulsi di larghezza variabile, sia positivi sia negativi) e si forma la tensione di fase V_{UO} . Quando la modulante W incrocia la tensione portante avviene la commutazione dell'interruttore S3 e si forma la tensione di fase V_{WO} . Lo stesso vale per la modulante V che genera il comando sull'interruttore S2 e la tensione di linea V_{VO} . La tensione concatenata V_{UW} si trova:

$$V_{UW} = V_{UO} - V_{WO}$$

Lo stesso vale per le altre due tensioni concatenate.



La larghezza di ciascun impulso segue la forma della sinusoide: impulsi più larghi corrispondono ai picchi della sinusoide, e impulsi più stretti corrispondono ai suoi zeri.

Dopo la commutazione, l'uscita dell'inverter è una sequenza di impulsi di tensione. Per ottenere una forma d'onda sinusoidale più "pulita", questi impulsi passano attraverso un filtro a bassa frequenza (tipicamente un filtro passa-basso), che smussa la sequenza di impulsi trasformandola in una tensione sinusoidale, alimentando il motore come avevamo desiderato.

Tra i vantaggi principali di questa tecnica di modulazione vi è la qualità dell'onda e un controllo abbastanza preciso della tensione e della frequenza. Tra gli svantaggi vi sono le perdite di commutazione ad alte frequenze, la complessità del circuito e una piccola distorsione armonica.

2.2 Convertitori DC/DC

Funzione dei convertitori DC/DC

I convertitori DC-DC nelle auto elettriche svolgono un ruolo cruciale nella gestione dell'energia all'interno del veicolo. Questi dispositivi convertono la tensione continua (DC)

fornita dalla batteria principale (tipicamente 200V - 800 V) in altre tensioni DC più basse o più alte, necessarie per alimentare diversi componenti elettrici ed elettronici del veicolo.

Infatti, molti sistemi elettronici e ausiliari, come luci, sensori, centraline elettroniche e il sistema di infotainment, richiedono tensioni più basse, solitamente 12V, che non possono essere direttamente fornite dalla batteria principale. Il compito del convertitore DC-DC è quello di abbassare o adattare la tensione della batteria principale per soddisfare questo tipo di esigenze.

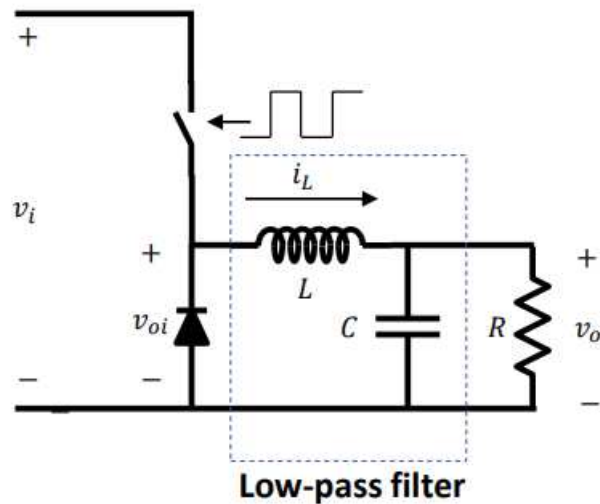
Anche se un'auto elettrica dispone di una batteria di trazione ad alta tensione, è generalmente presente una batteria ausiliaria a 12V per alimentare i componenti essenziali quando il veicolo è spento. Il convertitore DC-DC garantisce che questa batteria a bassa tensione venga ricaricata durante il funzionamento del veicolo.

Tipologie dei convertitori

- **Convertitore Buck:** detto anche convertitore step-down, riduce la tensione DC ad alto voltaggio della batteria principale a una tensione più bassa (di solito 12 V), per alimentare i sistemi ausiliari del veicolo, come i fari, l'elettronica di bordo, sistemi di sicurezza e l'illuminazione interna.
- **Convertitore Boost:** detto anche convertitore step-up, ha in ingresso una tensione bassa (12 V) e trasferisce in uscita una tensione maggiore.
- **Convertitore Buck-Boost:** in alcuni veicoli elettrici, si utilizzano convertitori bidirezionali che possono sia abbassare che alzare la tensione. Questi convertitori consentono il flusso di energia in entrambe le direzioni, ad esempio tra la batteria principale e il sistema di batterie a bassa tensione.

Funzionamento e struttura di un Buck-Converter

Il convertitore Buck, come già detto, è un convertitore DC-DC che trasmette in uscita una tensione più bassa e stabile rispetto a quella presente in ingresso [9].



Dall'immagine soprastante si può vedere di quali elementi principali è costituito un convertitore Buck semplice con controllo a catena aperta:

- La tensione di ingresso V_i
- Un interruttore controllato, tipicamente un transistor Mosfet, capace di operare ad elevate frequenze
- Un diodo di ricircolo, che risolve il problema dell'energia immagazzinata nell'induttore quando l'interruttore è aperto, permettendo alla corrente di scorrere attraverso di esso.
- Un'induttanza L e una capacità C che insieme formano un filtro passa-basso che serve per limitare il contenuto armonico
- Carico resistivo, soggetto alla tensione di uscita V_o stabilizzata e pressoché costante

Regolando opportunamente il duty cycle dell'onda quadra fornita al terminale di gate del Mosfet (e quindi i tempi di accensione e spegnimento dell'interruttore) si ottiene un'ulteriore onda quadra, la quale viene poi filtrata dal filtro L - C , che preleva la sua componente media. Si ottiene così in uscita una tensione circa costante, con un piccolo ripple residuo a causa delle caratteristiche del filtro. La formula del calcolo della tensione di uscita di un convertitore Buck ad anello aperto è la seguente:

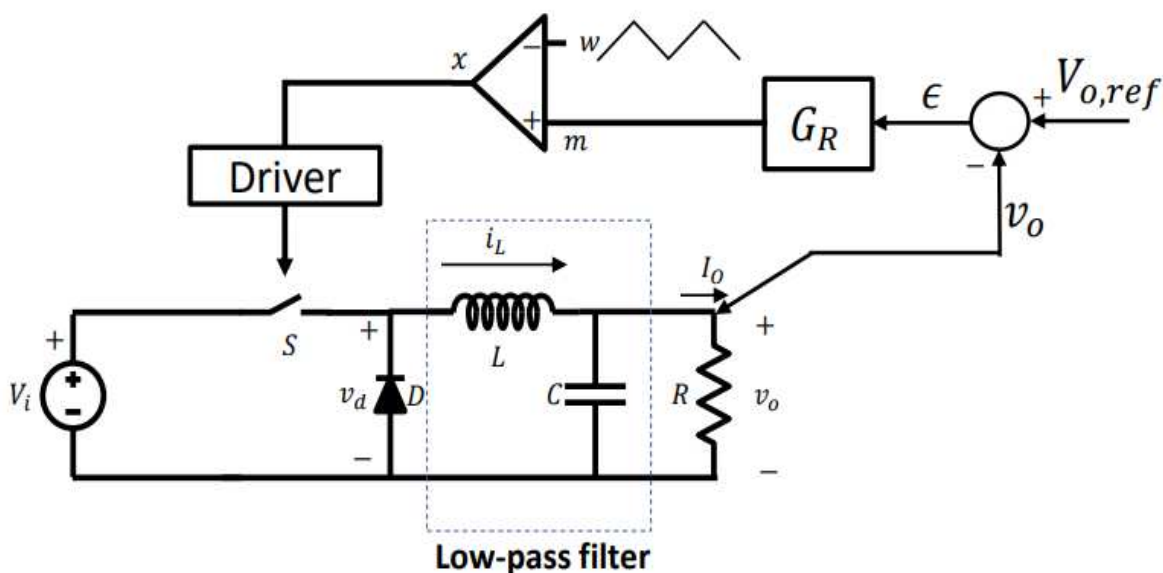
$$V_o = \frac{t_{on}}{T} V_i = \delta V_i$$

Otteniamo quindi che la tensione di uscita è direttamente proporzionale alla tensione di ingresso e al duty-cycle.

Controllo in catena chiusa di un Buck-Converter

Il controllo a catena aperta ha il vantaggio di essere piuttosto semplice, ma nelle auto elettriche è preferibile usare il controllo in catena chiusa per problematiche legate alla stabilità, precisione, efficienza e sicurezza. Infatti, questo tipo di controllo utilizza un feedback per regolare continuamente l'uscita, mantenendo la tensione costante anche in presenza di rapide variazioni di carico o di tensioni di ingresso. La retroazione consente inoltre di ridurre il margine di errore sulla tensione di uscita rispetto al controllo in catena aperta, migliorando in questo modo le prestazioni del convertitore, a costo di aumentare la complessità del circuito.

Ecco uno schema di principio che mostra a grandi linee una possibile soluzione per il controllo in catena chiusa del convertitore Buck [9]:

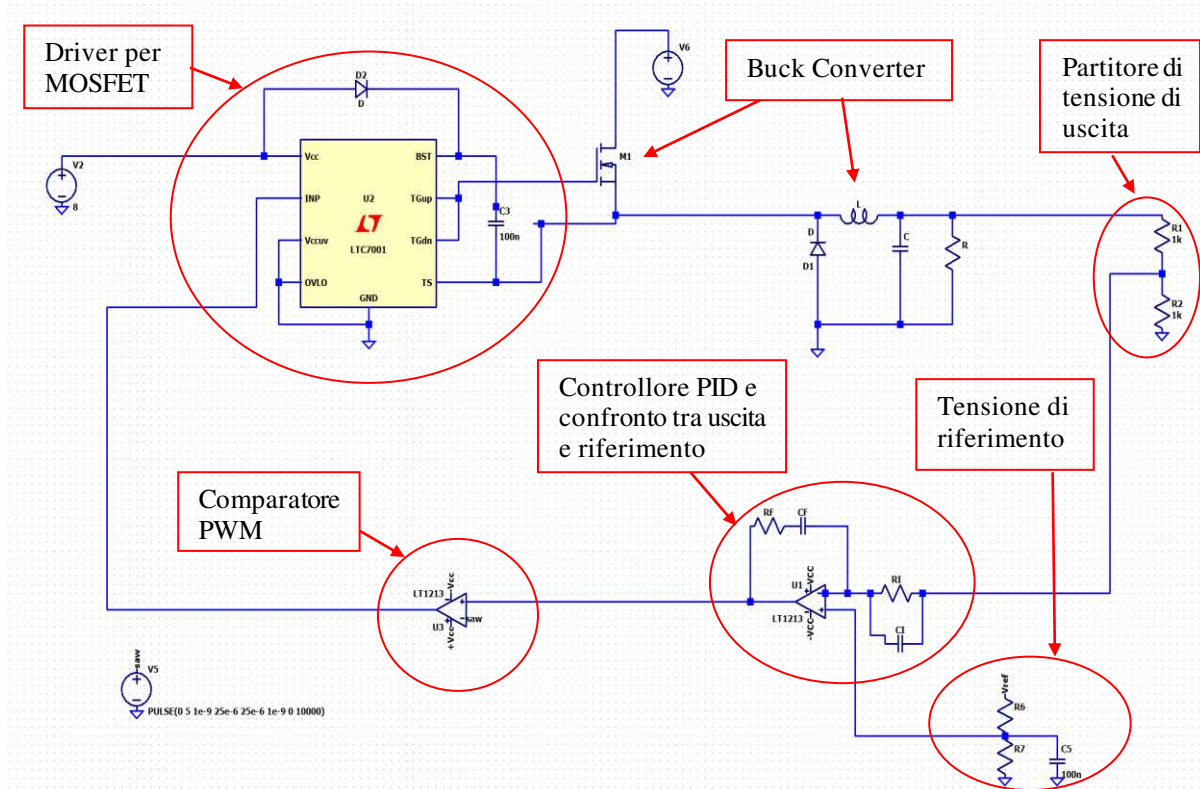


Lo schema parte dalla configurazione in catena aperta, a cui vengono aggiunti altri blocchi:

- Un blocco che confronta la tensione di uscita del Buck con una tensione di riferimento e ne valuta l'errore
- L'errore va in ingresso a un sistema controllo (tipicamente un controllore PID), che ha il compito di rendere il sistema stabile, preciso e veloce
- In uscita dal sistema di controllo vi è il segnale modulante, il quale viene confrontato con un segnale triangolare (segnale portante) attraverso un comparatore (tecnica PWM)

- Il comparatore PWM fornisce un segnale a onda quadra, risultato del PWM, che comanda il driver, che a sua volta pilota l'interruttore (transistor) del convertitore Buck.

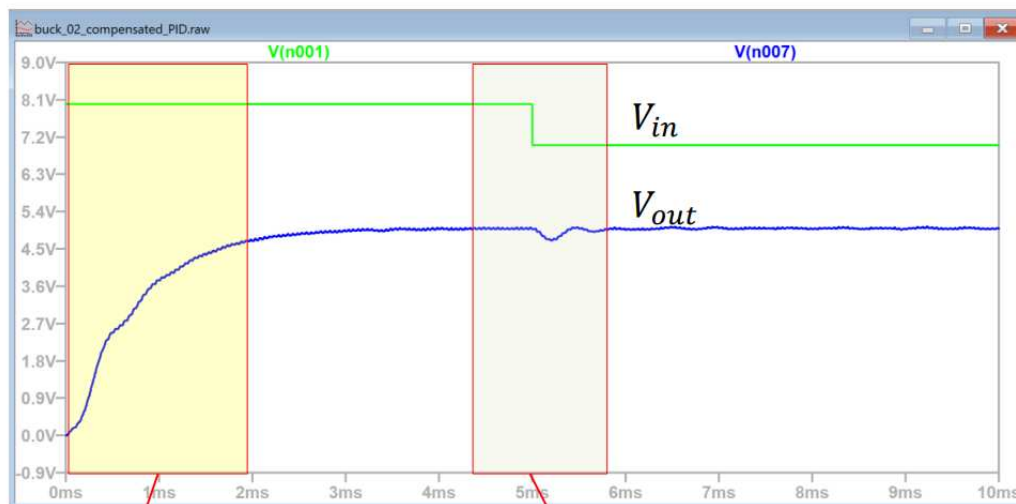
Una possibile implementazione dello schema a blocchi precedente, ovvero un controllo a retroazione di un Buck converter è la seguente [9]:



Nel circuito sopra, è possibile osservare che i Mosfet hanno necessariamente bisogno di un driver per essere pilotati, soprattutto per quanto riguarda le applicazioni di potenza. Infatti, i gate dei Mosfet hanno una capacità parassita che deve essere caricata o scaricata rapidamente per accendere o spegnere il transistor. I driver dei Mosfet sono progettati per fornire correnti sufficienti per caricare e scaricare rapidamente questa capacità, consentendo una commutazione veloce. Un'altro motivo per cui i driver sono utilizzati è perché offrono isolamento tra il circuito di controllo (in cui le tensioni sono basse, 5 V o 3.3 V) e il circuito di potenza, permettendo di evitare che segnali a bassa tensione siano influenzati dai disturbi ad alta potenza.

Inoltre, è possibile osservare che all'uscita del Buck è presente un partitore di tensione, che è necessario per ridurre la tensione di uscita del convertitore in modo da raggiungere un livello di tensione adeguato per poter essere elaborato da una logica di controllo di retroazione.

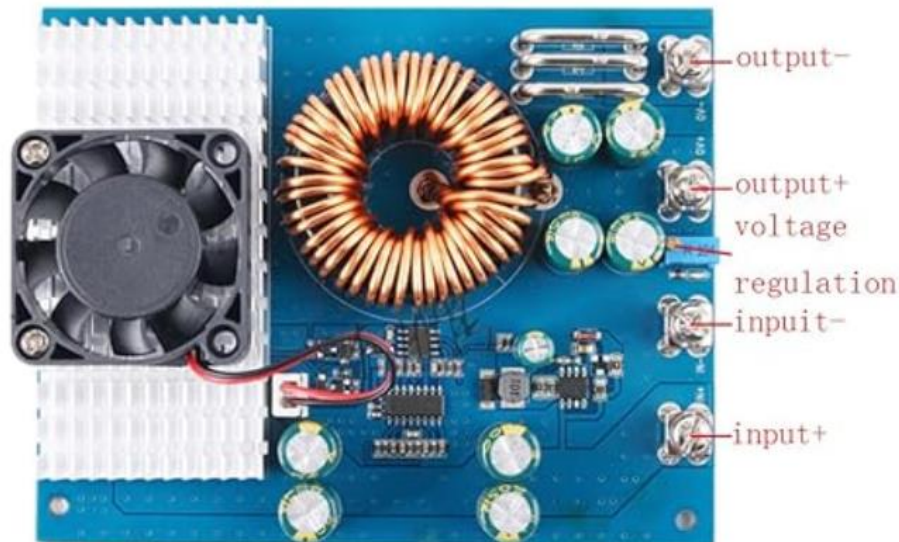
Nella parte di circuito relativo alla tensione di riferimento è spesso collegato un condensatore. Esso viene inserito per due principali motivi: filtraggio del rumore e stabilizzazione del circuito di controllo. Questo impedisce che il sistema risponda in modo brusco a piccoli cambiamenti, contribuendo alla stabilità dinamica del convertitore e migliorando la risposta ai carichi variabili (o alle tensioni di riferimento variabili, a causa per esempio di perturbazioni) [9].



Transitorio stabile grazie al condensatore collegato alla tensione di riferimento

Le perturbazioni nella tensione di ingresso sono immediatamente compensate grazie alla rete di retroazione, garantendo stabilità e precisione al sistema

Di seguito è riportato un esempio pratico di convertitore Buck, in cui è possibile notare i terminali di ingresso, di uscita e quello di regolazione:



Scheda elettronica di un convertitore Buck

2.3 Gestione frenata rigenerativa

Nelle auto elettriche, la frenata rigenerativa gioca un ruolo molto interessante, perché permette di aumentare l'efficienza migliorando l'autonomia, riducendo consumi energetici e riducendo l'usura dei freni tradizionali.

Durante una frenata, si interrompe l'erogazione di corrente diretta verso il motore. Quest'ultimo si trasforma in un generatore trascinato dalle ruote del mezzo, le quali si muovono per inerzia. Il motore, che ora si comporta come un generatore, sottrae energia cinetica del veicolo, il quale comincerà a rallentare. L'efficienza elevata del moto-generatore (circa 95%) permette di recuperare approssimativamente l'85%-90% dell'energia cinetica sottratta, che viene immagazzinata nelle batterie (per questo motivo è chiamata frenata rigenerativa). Invece, nelle auto termiche, la frenata è completamente dissipativa, di conseguenza tutta l'energia cinetica si trasforma in calore che si diffonde nell'ambiente.

La frenata rigenerativa consente di ottenere i seguenti vantaggi:

- Riduzione consumi ed emissioni
- Riduzione usura parti meccaniche
- Aumento di efficienza del veicolo

- Prolungamento vita batterie

Capitolo 3

Sfide Tecnologiche

Nonostante i loro vantaggi, le auto elettriche affrontano alcune sfide. La autonomia limitata delle batterie può essere un problema per i viaggi lunghi, anche se le recenti innovazioni stanno migliorando questo aspetto. Inoltre, la rete di stazioni di ricarica deve essere ampliata per supportare una maggiore adozione di veicoli elettrici. Infine, il costo iniziale delle auto elettriche può essere più alto rispetto ai veicoli a combustione, anche se i costi stanno diminuendo con l'evoluzione della tecnologia e l'aumento della produzione.

3.1 Autonomia e Capacità delle Batterie

Come abbiamo già messo in evidenza le batterie agli ioni di litio, che sono la tipologia di alimentazione per auto elettriche più diffusa al mondo, presentano numerosi vantaggi; tuttavia, le aziende più grandi stanno cercando in tutti i modi di trovare soluzioni ancora più prestanti. In particolare, uno dei parametri tecnologici (riguardanti le batterie) su cui si sta lavorando con grande impegno è sicuramente la densità energetica.

Densità energetica e relativi vantaggi del suo aumento

La densità energetica è definita come la quantità di energia immagazzinata in un dato volume di un sistema di batterie. Quindi aumentare la densità energetica equivale aumentare la quantità di energia per unità di volume, consentendo tempi di funzionamento più lunghi tra una ricarica e l'altra, aumentando così l'autonomia del veicolo elettrico. Inoltre, le batterie ad alta densità di energia consentono uno stoccaggio efficiente dell'elettricità in eccesso generata durante i periodi di punta della produzione per un utilizzo successivo quando la produzione rinnovabile è bassa o la domanda è elevata.

La densità energetica viene misurata utilizzando due unità di misura: wattora per chilogrammo (Wh/kg), che rappresenta la quantità di energia che può essere estratta da un chilogrammo di massa della batteria, e wattora per litro (Wh/L), che rappresenta la quantità di energia che può contenere una batteria in un litro di volume.

Nel 2008 le batterie agli ioni di litio avevano una densità media di 55 wattora per litro; nel 2020 sono arrivate a 450 wattora per litro di media, ed è previsto un ulteriore aumento.

3.2 Sistemi di Ricarica

Con la diffusione dei veicoli elettrici, uno dei principali aspetti che sta guadagnando sempre più attenzione è la loro ricarica veloce. Una delle principali sfide che gli automobilisti trovano più conveniente e praticabile.

I sistemi di ricarica per veicoli elettrici (EV) forniscono l'energia necessaria per ricaricare la batteria del veicolo. La velocità di ricarica dipende principalmente da due fattori: la capacità della batteria dell'auto e il tipo di sistema di ricarica utilizzato.

Le batterie delle auto elettriche sono generalmente classificate in base alla loro capacità di immagazzinare energia, che viene misurata in kilowattora (kWh). Le auto elettriche più comuni hanno batterie con capacità comprese tra i 40 kWh e i 100 kWh, anche se ci sono modelli con capacità superiori.

I sistemi di ricarica dei veicoli elettrici sono normalmente classificati in quattro tipologie [10]:

1. **Ricarica AC senza PWM:** non è adatto ad auto ma solo per scooter e monopattini, e richiede l'uso di una semplice connessione tra veicolo e la presa elettrica tramite un cavo di ricarica con potenze circa di 2 kW.
2. **Ricarica AC domestica/industriale:** sul cavo di alimentazione del veicolo elettrico è presente un dispositivo denominato control box (sistema di sicurezza PWM) che garantisce la sicurezza delle operazioni durante la carica, le prese utilizzabili sono quelle domestiche o industriali fino a 32A (sia monofase che trifase, max 22 kW, tempo di ricarica 4-8 ore).

3. **Ricarica AC pubblica:** prevede l'installazione di un dispositivo a parete (wallbox) o di un'altra infrastruttura fissa (colonnina) funzionante a corrente alternata. In essa è presente il sistema di sicurezza PWM, la ricarica può essere di tipo lento (16A 230V) oppure rapido (fino a 32A. 400V).
4. **Ricarica ultrarapida in corrente continua DC:** Tale tipo di ricarica è caratterizzato dall'uso di caricabatterie in corrente continua (DC) rapidi ad alta potenza (fino a 200A, 400 V), consentendo di ricaricare l'auto elettrica in pochi minuti (tipo di carica più veloce in assoluto). Le stazioni di ricarica sono pubbliche e si possono trovare lungo le autostrade. Esistono due standard, CHAdeMO (Giapponese) e CCS Combo (Europeo).

3.3 V2G (Vehicle-to-Grid) e ricarica bidirezionale

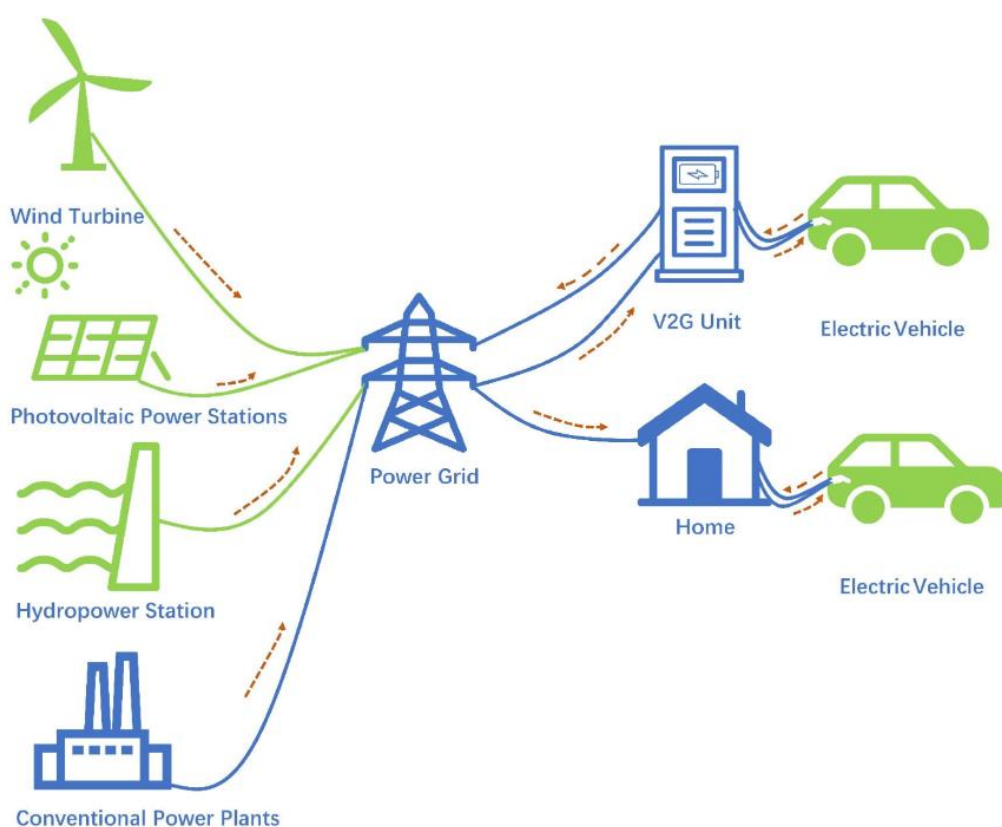
Il Vehicle-to-Grid (V2G) è una tecnologia innovativa che permette ai veicoli elettrici (EV) di scambiare energia con la rete elettrica. Questo processo si basa sulla bidirezionalità del flusso energetico, reso possibile da tecnologie avanzate sia nei veicoli che nelle infrastrutture di ricarica.

In una normale ricarica, l'auto preleva energia dalla rete per alimentare la sua batteria. Con V2G, l'energia può fluire in entrambe le direzioni: l'auto può assorbire energia durante la ricarica e restituirla alla rete quando richiesto.

Sappiamo che la domanda di energia non è sempre costante: ci sono momenti in cui c'è un picco di richiesta di energia elettrica, ad esempio nelle ore serali, quando parecchie persone accendono luci, elettrodomestici, riscaldamento, ecc. Durante questi momenti, la rete elettrica potrebbe avere qualche problema a soddisfare tutti gli utenti, soprattutto se basata su fonti rinnovabili come il solare o l'eolico, le quali producono energia in modo intermittente (ad esempio durante il giorno c'è molta energia solare, mentre di notte no). Quando c'è eccesso di energia rinnovabile durante il giorno, le auto elettriche possono caricare le loro batterie immagazzinando energia; mentre nelle ore di punta, le auto possono restituire parte di quella energia alla rete, contribuendo a dare un pulito equilibrio energetico e stabilizzare la rete elettrica.

I proprietari di veicoli elettrici che partecipano a un programma V2G potrebbero essere compensati per l'energia che forniscono alla rete, infatti, le compagnie energetiche sarebbero disposte a pagare in denaro o offrire sconti sulla bolletta in cambio dell'energia che prelevano dall'auto elettrica. Questo rende l'auto elettrica non solo un mezzo di trasporto, ma anche una risorsa economica.

Senza il V2G, durante i picchi di domanda di energia elettrica, le reti elettriche spesso devono attivare centrali elettriche di riserva, che sono molto costose e inquinanti (spesso basate su combustibili fossili come il carbone o il gas naturale). Se invece c'è abbastanza energia fornita dalle auto, queste centrali di emergenza non vengono attivate, il che riduce le emissioni di gas serra e i costi energetici [11].



Controllo intelligente del V2G

Se la batteria di un'auto elettrica cede energia alla rete, la sua autonomia (distanza ancora percorribile dal veicolo fino a quando si scarica) potrebbe diminuire. Tuttavia, ci sono diverse strategie per gestire questo aspetto in modo efficace, garantendo che l'auto sia comunque

pronta a essere utilizzata in caso di bisogno. I sistemi V2G sono gestiti da software intelligenti che assicurano che l'auto restituisca energia elettrica alla rete solo quando non necessario o quando l'impatto sull'autonomia sarà minimo. Ad esempio, se sappiamo che serviranno 100 Km di autonomia per il giorno successivo, è possibile programmare il sistema per cedere energia alla rete (guadagnando o risparmiando) senza scendere mai sotto quel livello di carica. Quindi, i sistemi V2G possono essere programmati in base alle abitudini di guida dell'automobilista, basato sul numero di chilometri che vengono percorsi quotidianamente. Tuttavia, nel caso in cui si avesse bisogno di un viaggio più lungo, è possibile pianificarlo in anticipo (per esempio disattivando il programma V2G), cosicché la macchina sarà completamente carica quando necessaria.

3.4 Degradazione delle Batterie

Invecchiamento ciclico

Le batterie agli ioni di litio subiscono in maniera irreversibile a un deterioramento delle prestazioni nel tempo a causa dei ripetuti cicli di carica/scarica. L'invecchiamento ciclico avviene a seguito di processi chimici e fisici che si verificano all'interno della batteria durante ogni ciclo. Le principali cause sono [12]:

- Degradazione dei materiali attivi e dell'elettrolita: durante i cicli di carica/scarica, i materiali che compongono il catodo, l'anodo e l'elettrolita subiscono modifiche strutturali, perdendo la capacità di accumulare e rilasciare elettroni in modo efficiente.
- Formazione del SEI (Solid Electrolyte Interphase): Durante i cicli iniziali, si forma uno strato di passivazione chiamato SEI sull'anodo (come già spiegato nel primo capitolo). Questo strato è necessario per proteggere la batteria, ma diventa sempre più spesso, riducendo l'efficienza della batteria.
- Crescita dei dendriti: In alcuni casi, la deposizione di litio sull'anodo può formare strutture dendritiche (simili a piccoli aghi) che possono causare cortocircuiti interni, accelerando il degrado della batteria.

Con l'aumento dei cicli di carica e scarica, l'invecchiamento ciclico provoca diversi effetti negativi che riducono le prestazioni della batteria tra cui: diminuzione dell'energia

immagazzinabile nella batteria, aumento della resistenza interna, riduzione di potenza e erogazione di corrente e di conseguenza un'autonomia ridotta.

Capitolo 4

Sostenibilità e Impatti Ambientali

Le auto elettriche offrono numerosi vantaggi rispetto ai veicoli tradizionali. Innanzitutto, sono più ecologiche, riducendo le emissioni di CO₂ e altri inquinanti. Inoltre, i motori elettrici sono generalmente più silenziosi e richiedono meno manutenzione, poiché hanno meno parti mobili rispetto ai motori a combustione interna. Le auto elettriche possono anche beneficiare di incentivi fiscali e agevolazioni per la ricarica, a seconda delle normative locali.

4.1 Politiche europee in ambito di mobilità elettrica e Green Deal

Europeo

Le politiche europee in ambito mobilità elettrica si concentrano sul raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione e transizione energetica per ridurre le emissioni di gas serra e favorire la sostenibilità ambientale. L'Unione Europea (UE) ha sviluppato strategie e regolamenti per promuovere la mobilità elettrica (considerata cruciale per il raggiungimento degli obiettivi legati alla sostenibilità), migliorare l'efficienza energetica dei trasporti, ridurre la dipendenza dei combustibili fossili e migliorare la qualità dell'aria.

Tra i principali progetti lanciati dall'UE in ambito di sostenibilità per mobilità elettrica, vi è sicuramente il Green Deal Europeo, un piano strategico europeo lanciato nel 2019. Oggi, le emissioni dei trasporti rappresentano circa il 25% delle emissioni totali di gas serra dell'UE e queste emissioni sono addirittura aumentate negli ultimi anni.

L'obiettivo principale di tale progetto europeo è far diventare l'Europa il primo continente a impatto climatico zero entro il 2050, e ciò richiede grandi cambiamenti nei trasporti in modo da ottenere una riduzione del 90% delle emissioni gas serra legate ai trasporti entro il 2050.

La Commissione Europea ha introdotto normative rigorose per le emissioni di CO₂ dei futuri veicoli, con lo scopo di spingere i produttori d'auto verso i veicoli elettrici. In particolare, sono previste le seguenti normative (o obiettivi) [13]:

- La riduzione del 55% delle emissioni delle auto entro il 2030
- La riduzione del 50% delle emissioni dei furgoni entro il 2030
- 0 emissioni delle nuove auto entro il 2035

Quest'ultima implica che sarà vietata la vendita di nuove auto con motore a combustione interna all'interno dell'Unione Europea, rendendo obbligatoria la transizione verso veicoli elettrici a zero emissioni.

Per favorire ciò la Direttiva sulle infrastrutture per i carburanti alternativi (AFID) e il nuovo regolamento AFIR (Alternative Fuels Infrastructure Regulation) stabiliscono linee guida per l'installazione di ricarica per veicoli elettrici in tutta Europa.

In particolare, il nuovo regolamento per l'implementazione di infrastrutture per combustibili alternativi (AFIR) stabilisce obiettivi di implementazione obbligatori per la costruzione di infrastrutture di ricarica elettrica e rifornimento di idrogeno per il settore stradale. Grazie a questa iniziativa sarà disponibile un sufficiente numero di infrastrutture di ricarica e rifornimento in tutta l'UE, in modo da porre fine alle preoccupazioni da parte dei consumatori sulla difficoltà di ricaricare e rifornire il mezzo. L'AFIR apre inoltre la strada a un'esperienza di ricarica e rifornimento di semplice utilizzo, con un'adeguata trasparenza dei prezzi, opzioni di pagamento minimo comuni e informazioni coerenti per i clienti e consumatori in tutta l'UE. Gli obiettivi principali di AFIR legati alla mobilità elettrica, che dovranno essere raggiunti nel 2025 o nel 2030, sono i seguenti [13]:

- L'infrastruttura di ricarica per auto e furgoni deve crescere alla stessa velocità della produzione dei veicoli. Per ogni auto elettrica a batteria immatricolata in dato stato membro, deve essere fornita una potenza pari 1,3 kW da un'infrastruttura di ricarica accessibile al pubblico. Inoltre, ogni 60 km lungo la rete stradale europea dei trasporti, devono essere installate stazioni di ricarica rapida di almeno 150 kW a partire dal 2025.
- Le stazioni di ricarica dedicate ai veicoli pesanti con una potenza minima di 350 kW devono essere distribuite ogni 60 km lungo la rete centrale TEN-T (Trans-European Transport Network, che è l'insieme di infrastrutture di trasporto sviluppate dall'Unione Europea per migliorare i collegamenti e l'efficienza dei trasporti all'interno dell'UE) e ogni 100 km sulla rete globale TEN-T più ampia a partire dal 2025, con una copertura completa della rete da raggiungere entro il 2030. Inoltre, le

stazioni di ricarica devono essere installate in aree di parcheggio sicure e protette per la ricarica notturna e nei nodi urbani per i veicoli di consegna.

- I gestori di stazioni di ricarica elettrica e di rifornimento di idrogeno devono garantire la totale trasparenza dei prezzi, offrire un metodo di pagamento comune ad hoc, come carta di credito o di debito, e rendere disponibili i dati rilevanti come quelle relativi alla posizione, tramite mezzi elettronici, garantendo così al cliente una completa informazione.

4.2 Produzione e Smaltimento delle Batterie

Processo di estrazione del litio e del cobalto

Dopo l'esaurimento delle batterie agli ioni di litio delle auto elettriche, esse devono essere portate presso centri specializzati per il trattamento di questi componenti. Tale modalità consente di salvaguardare l'ambiente evitando qualsiasi tipologia di inquinamento.

Il costo di smaltimento delle batterie delle macchine elettriche è piuttosto elevato, con tariffe che mediamente vanno dai 4 e i 4,5 euro al Kg (valore che dipende anche dalle condizioni del dispositivo).

Riciclo delle batterie

Tuttavia, è possibile optare per il riciclo delle batterie dei veicoli green, cosa che in Europa i livelli sono tra i più elevati al mondo (circa metà delle batterie vengono riciclate). Il loro riutilizzo consente di abbattere le emissioni inquinanti fino al 30% rispetto ai veicoli a combustione interna.

Nel mondo sono in costruzione degli stabilimenti finalizzate al riciclo delle batterie al litio. I progetti sono di due diversi tipi:

- Recuperare i materiali preziosi che si presentano all'interno di essa, come litio, cobalto, nichel
- Riutilizzare la batteria rigenerata in altre applicazioni energetiche.

4.3 Analisi del Ciclo di Vita (LCA) e valutazione emissione di CO2

Per quanto riguarda le emissioni di CO₂, le auto elettriche sono del 55% inferiori rispetto a un mezzo a combustione interna a benzina e del 47% inferiori rispetto a uno diesel.

Inoltre, negli EV è particolarmente importante considerare l'inquinamento legato alla produzione di energia elettrica usata per alimentarli, specialmente se l'elettricità generata proviene da fonti di energia non rinnovabili (nonostante questo sono comunque meno inquinanti rispetto ai veicoli endotermici).

Emissione di CO₂ allo scarico

Le auto elettriche, a differenza dei veicoli a benzina, metano o ibridi, registrano emissioni praticamente nulle di CO₂ allo scarico. Un veicolo a benzina della stessa dimensione produce almeno 0.124 kg di CO₂ al chilometro, 0.103 kg per una al metano e 0.113 per una ibrida [14]. Quindi possiamo concludere che, per quanto riguarda le emissioni di CO₂ allo scarico, le auto elettriche sono di gran lunga i vincitori.

Per comprendere in modo completo l'impatto ambientale dei veicoli elettrici, bisogna considerare l'intero ciclo di vita del mezzo, dalla realizzazione delle batterie fino al loro smaltimento.

Emissione totale di CO₂ nel ciclo di vita

Se consideriamo l'intero ciclo di vita del veicolo, il divario nelle emissioni, tra i diversi tipi di mezzi, diminuisce radicalmente. Per una distanza percorsa di 75000 km, un'automobile a benzina produce approssimativamente 15.1 tonnellate di CO₂, un'auto elettrica produce invece 12.2 tonnellate, l'ibrida 13.8 tonnellate e quella a metano 13.1 tonnellate [14]. Ciò mette in evidenza che, nonostante il divario nelle emissioni allo scarico tra EV e gli altri tipi di veicoli sia ben marcato, le emissioni totali a lungo termine sono adeguatamente confrontabili, perché esse dipendono anche da altri fattori come la produzione e la ricarica delle batterie.

Tabella relativa ai costi socio-economici annuali legati alla circolazione dei veicoli (€/km)

	Benzina			Diesel		
	Small	Medium	Large-SUV	Small	Medium	Large-SUV
Euro 0	465,72	723,45	1.042,97	462,33	655,20	838,34
Euro 1	193,15	290,59	395,53	320,77	444,25	558,40
Euro 2	170,07	257,00	374,80	314,82	433,16	538,48
Euro 3	157,08	241,16	319,14	295,46	412,67	519,79
Euro 4	160,29	245,43	378,10	268,20	377,62	478,65
Euro 5	157,26	241,47	373,78	243,01	345,14	440,73
Euro 6	157,31	241,54	373,86	226,20	323,52	415,51
	Ibrido benzina			Metano		
	Small	Medium	Large-SUV	Small	Medium	Large-SUV
	73,29	73,29	110,04	114,38		
	Elettrico					
	Small	Medium	Large-SUV			
	98,21					

La tabella sopra riportata [15] mostra dei valori che tengono conto dell'impatto dei danni ambientali (emissioni inquinanti di Particolato, Ossidi di Azoto, Monossido di Carbonio e climalteranti di CO₂) in relazione alla cilindrata/dimensione (piccolo, medio, grande-SUV), al sistema di alimentazione (benzina, diesel, ibrido benzina, metano, elettrico) e alla classe Euro (caratteristica riservata solo a veicoli a benzina e diesel).

Dalla tabella è possibile notare, per quanto riguarda i veicoli a benzina e diesel, che il costo socio-economico aumenta all'aumentare della dimensione e della classe Euro (Euro 0 avrà valori più alti rispetto a Euro 6). Inoltre, è osservabile che i veicoli elettrici, a metano e ibridi hanno valori di gran lunga più bassi rispetto a quelli a benzina e diesel; tuttavia, esistono comunque spese associate all'estrazione e alla produzione di batterie, alle infrastrutture di ricarica e alla generazione di energia (in particolare quella proveniente da fonti non rinnovabili). Di conseguenza i veicoli elettrici, a metano e ibridi avranno costi socio-economici bassi, ma comunque ben maggiori di zero.

Strategie per la riduzione delle emissioni

Considerando le informazioni descritte precedentemente, una strategia per ridurre le emissioni è l'incremento della produzione dei veicoli elettrici, cercare di riciclare un numero di batterie più alto possibile e utilizzare il più possibile fonti di energia rinnovabile per la ricarica delle batterie.

Conclusione

In un mondo in cui l'inquinamento rappresenta una delle principali minacce alla salute umana e all'ambiente, la transizione verso la mobilità elettrica rappresenta uno degli obiettivi più rilevanti per la decarbonizzazione del settore dei trasporti e per la riduzione dell'impatto ambientale delle attività umane. In questa dinamica, i sistemi di accumulo e quelli di conversione dell'energia delle auto elettriche svolgono un ruolo fondamentale, perché permettono di immagazzinare energia elettrica e di convertirla in energia meccanica, permettendo il movimento del veicolo elettrico in modo efficiente grazie all'uso del convertitore DC-AC, ovvero l'inverter.

Dallo studio effettuato, possiamo dire che le batterie agli ioni di litio costituiscono attualmente la principale tecnologia sul mercato riguardante l'immagazzinamento di energia elettrica, per via dei suoi innumerevoli vantaggi (elevata densità energetica, lunga durata, efficienza maggiore rispetto alle vecchie tecnologie).

Tuttavia, come sempre, industrie e scienziati stanno facendo di tutto per migliorare ulteriormente le attuali tecnologie, investendo nella ricerca e sviluppo di nuove soluzioni, come le batterie allo stato solido, che promettono di migliorare ancora di più la sicurezza, la capacità di immagazzinare energia e i tempi di ricarica.

I sistemi di conversione dell'energia, come gli inverter e i convertitori DC-DC, sono anch'essi in continuo miglioramento in modo da garantire un'efficienza sempre più maggiore nella gestione dell'energia all'interno delle auto elettriche, contribuendo a ridurre le perdite di energia, aumentando l'efficienza, e aumentando l'autonomia del veicolo consentendogli di percorrere distanze maggiori.

Sistemi di accumulo e sistemi di conversione lavorano spesso in sintonia tra loro, in modo da migliorare le prestazioni e le funzionalità, come ad esempio attraverso la gestione della frenata rigenerativa, la gestione del BMS e la gestione del sistema di ricarica bidirezionale. In tal modo la guida elettrica sarà sempre più competitiva rispetto alle tradizionali motorizzazioni a combustione interna.

Nonostante tutti i progressi scientifici e le varie innovazioni, esistono ancora diverse problematiche in merito alla produzione delle auto elettriche. Tra queste, una delle più rilevanti è l'approvvigionamento delle materie prime necessarie per la produzione delle batterie, il cui costo e la lontana provenienza rallenta la diffusione dei veicoli elettrici. Inoltre, la gestione del fine vita delle batterie, con il loro smaltimento e riciclo, rappresenta una sfida per evitare un accumulo di rifiuti tossici e per recuperare i materiali preziosi al loro interno. Infine, la diffusione della mobilità elettrica richiede un adeguamento delle infrastrutture di ricarica, con una rete più vasta e rapida, in modo da soddisfare le esigenze degli utilizzatori di mezzi elettrici.

In conclusione, penso sia conveniente investire nelle auto elettriche e nelle nuove innovazioni tecnologiche ad esse correlate, in modo da cercare di ridurre l'inquinamento e rendere il mondo un po' più pulito ed ecosostenibile; anche perché il progetto del Green Deal europeo impedirà progressivamente la vendita di automobili a benzina e a diesel, rendendo praticamente obbligatori gli investimenti per le BEV.

Bibliografia

[1] Mobilità elettrica, perché le batterie fanno la differenza, Lifegate, Maggio 2020, Redazione, disponibile online: <https://www.lifegate.it/mobilita-elettrica-batterie-fanno-la-differenza>

[2] ScienceOnline, "Lithium-ion battery, How does it work?" YouTube, 28 febbraio 2023, disponibile online: <https://www.youtube.com/watch?v=VxMM4g2Sk8U>.

[3] "What is a Solid-State Battery? Uses, Pros & Cons (Explained)", eTechnophiles, aprile 2024, disponibile online:

<https://www.etechnophiles.com/solid-state-battery/#is-the-concept-of-solid-state-batteries-feasible>

[4] BMS nelle batterie al litio: cos'è e qual è la sua azione nel bilanciamento, Flash Battery srl, disponibile online: <https://www.flashbattery.tech/sistema-bms-batterie-litio-e-bilanciamento-celle/>

[5] "BEV, PHEV or HEV: The Differences Affect the Architecture" , Aptiv, 2023, disponibile online: <https://www.aptiv.com>

[6] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, "How Do Hybrid Electric Cars Work?" 2023, disponibile online: <https://afdc.energy.gov>

[7] AUTO ELETTRICHE: TUTTO STA NELLE BATTERIE! , Ala Engineering srl, 2021, disponibile online: <https://alaengineering.it/wp-content/uploads/2021/02/Auto-Elettrica-Tutto-sta-nelle-Batterie-Ala-Engineering.pdf>

[8] Farelettronica, Inverter e motori AC trifase – Power, (Maggio, 2020), Franco Musiari, disponibile online: <https://farelettronica.it/inverter-e-motori-ac-trifase/>

[9] Voltage Converters, materiale didattico del professor Meneghini Matteo dell'Università di Padova

[10] e-Station, Guida alla ricarica e-Station, Disponibile online:

<https://www.e-station.it/guida-alla-ricarica-html#:~:text=I%20CONNETTORI%20DI%20RICARICA,Lato%20Veicolo%20sia%20Lato%20Colonnina.>

[11] Shi, R.; Peng, S.; Chang, T.; Lee, K.Y. Annotated Survey on the Research Progress within Vehicle-to-Grid Techniques Based on CiteSpace Statistical Result. *World Electr. Veh. J.* 2023, *14*, 303, disponibile online:

<https://www.mdpi.com/2032-6653/14/11/303>

[12] Li, X., Suo, L., Hu, Y-S., & Chen, L. (2023). Formation of the Solid Electrolyte Interphase (SEI) and Electrolyte Degradation in Lithium-Ion Batteries: Mechanisms and Modeling Approaches. *Energy & Environmental Science*, Royal Society of Chemistry. Disponibile su: RSC Publishing.

[13] Commissione Europea. (n.d.). Mobilità e trasporti. Recuperato il 14 ottobre 2024, disponibile online: <https://transport.ec.europa.eu/>

[14] newauto.it, "EMISSIONI CO2 AUTO ELETTRICHE, CONFRONTO CON BENZINA, METANO E IBRIDE", Dicembre 2021, disponibile online: <https://www.newsauto.it/notizie/emissioni-co2-auto-elettriche-benzina-metano-ibride-2021-343368/>

[15] "Per una transizione ecorazionale della mobilità automobilistica italiana ", Fondazione Filippo Caracciolo, Novembre 2021, pag. 48, disponibile online:

<http://www.foroeuropa.it/documenti/rivista/Transizioneecorazionale2021.pdf>