

43 Gestione della macchina e propulsione ibrida

Prerequisiti

- Conoscere le unità di misura elettriche.
- Conoscere le reazioni di combustione.
- Conoscere i motori alternativi a combustione interna.
- Conoscere le leggi dei circuiti elettrici.
- Conoscere le macchine elettriche sia statiche che rotanti.

43.1 Controllo e gestione delle macchine a fluido

La misura è l'elemento da cui si parte per arrivare alla gestione del processo che avviene in una macchina o in un impianto. Il *sensore*, rileva la grandezza che deve essere tenuta sotto controllo e la trasforma in una grandezza a questa proporzionale: nel venturimetro la portata del fluido viene trasformata in una differenza di pressione, nella termocoppia la temperatura del fluido viene trasformata in una tensione elettrica ecc. L'*unità centrale* che gestisce l'intero processo confronta il valore della grandezza rilevata dal sensore con un riferimento (è il valore che si desidera raggiungere) ed emette un segnale in forma adatta, ad esempio di pressione o di tensione elettrica, da poter essere applicato all'attuatore. L'*attuatore*, elemento finale della catena, provvede a modificare le condizioni operative della macchina o dell'impianto in modo tale da raggiungere il valore atteso della grandezza controllata. L'attuatore può essere, ad esempio, un motore pneumatico, comandato dalla pressione, oppure un motore elettrico, comandato dalla tensione elettrica, che determina l'apertura o la chiusura di una valvola in modo tale da portare la macchina o l'impianto a funzionare nelle condizioni volute.

La gestione del processo consente di:

- ottimizzare il consumo energetico e proteggere l'ambiente;
- mantenere i valori prefissati di riferimento;
- aumentare la sicurezza di funzionamento;
- semplificare manutenzione e riparazione.

La trattazione generale dei principi e delle tecniche di controllo e gestione viene svolta nel corso di sistemi e automazione. Lo scopo di questa Unità è quello di mostrare come questi principi si applicano alle macchine a fluido considerando il caso specifico dei motori alternativi a combustione interna e in particolare la gestione del motore ad accensione comandata, gestione che, per la sua complessità, può ben comprendere i diversi aspetti della gestione di altre macchine a fluido.

Non vi è solo il problema della gestione del motore a combustione interna, ma esiste anche un problema di limiti di emissioni e prestazioni intrinseci al motore termico che anche la gestione più raffinata non riesce a superare. Questa Unità è così in massima parte dedicato allo studio della combinazione della macchina termica con la macchina elettrica

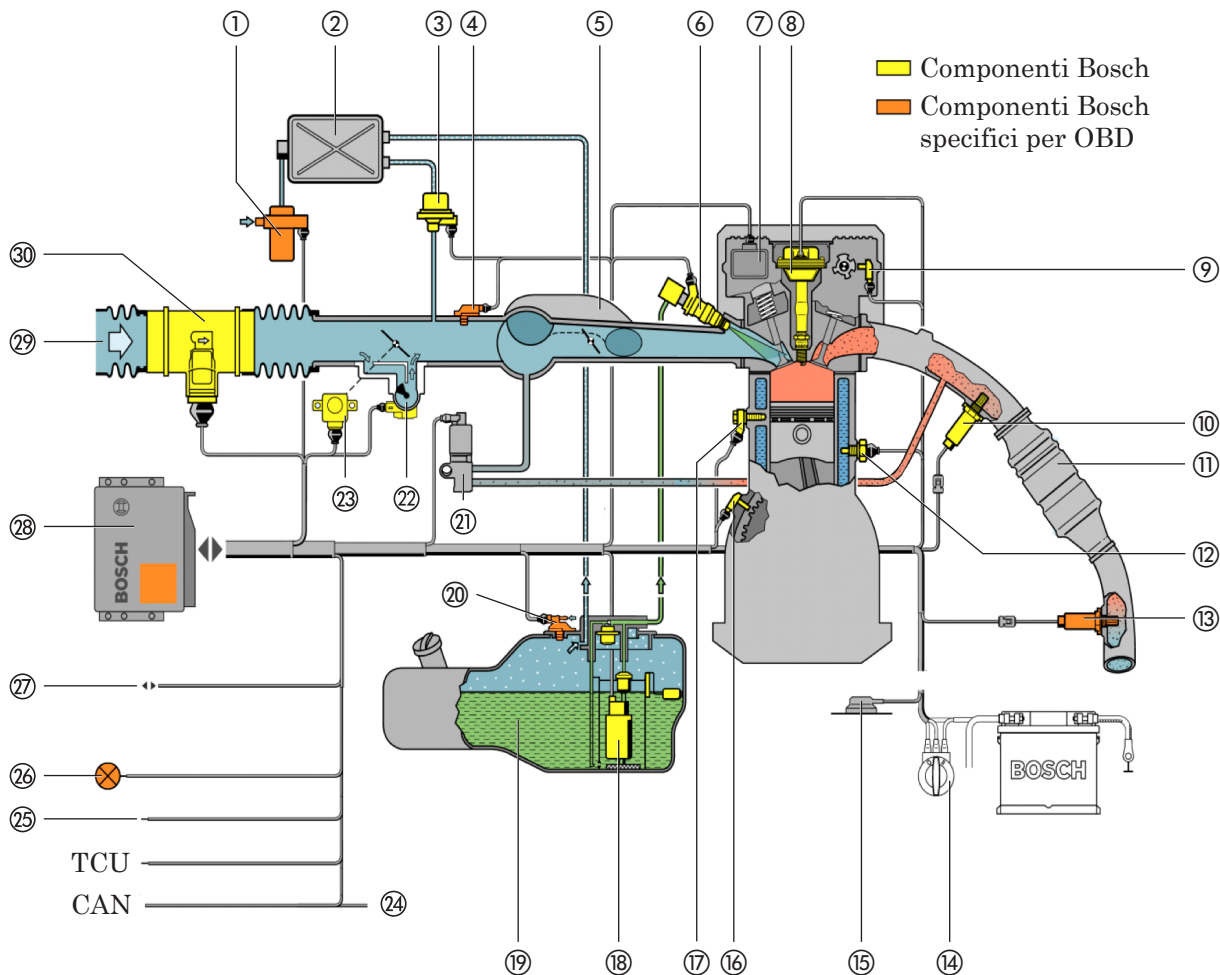
nella propulsione ibrida, che consente di superare i limiti del motore termico mediante una gestione integrata della potenza da distribuire su due macchine, così diverse ma anche così complementari nella loro diversità.

43.2 Applicazioni della gestione: esempio del motore ad accensione comandata

Nel motore ad accensione comandata il processo di combustione è determinato dalla massa di aria intrappolata nei cilindri all'istante di chiusura delle valvole di aspirazione, dalla massa di combustibile presente allo stesso istante e dal momento in cui la scintilla, scoccata dalla candela, inizia l'accensione della miscela di aria e combustibile. Occorre allora rilevare la massa d'aria richiamata dal comando farfalla-pedale acceleratore in funzione della domanda di coppia da parte dell'utente, calcolare e rendere disponibile la massa di combustibile per un adeguato rapporto aria/combustibile, individuare l'angolo motore al quale attuare l'accensione della miscela. La funzione primaria del sistema di gestione del motore (*engine management system*) è quella di coordinare i vari sottosistemi di controllo di queste tre grandezze – massa d'aria fresca nel cilindro, massa di combustibile e momento d'accensione – in modo da raggiungere le prestazioni richieste (in primo luogo una determinata curva di coppia in funzione della velocità di rotazione) e allo stesso tempo rendere minimi le emissioni di CO₂ (e cioè il consumo di combustibile) e di inquinanti (HC, CO, NO_x e PM) nelle varie condizioni di impiego del veicolo. Il sistema di gestione (*Figure 43.1 e 43.2*) è costituito da sensori (*sensors*), che rilevano i parametri motore, attuatori (*actuators*), che comandano l'introduzione del combustibile e l'accensione della miscela, e dalla centralina di controllo (ECU, *engine control unit*).

I **sensori** rilevano la grandezza fisica del motore e la trasformano in uscita in un'altra grandezza fisica di tipo elettrico (tensione, corrente, resistenza ecc.); ad esempio, la posizione del pedale acceleratore viene interpretata dal sistema come comando del conducente e viene quindi convertita in segnale elettrico di ingresso alla centralina di controllo tramite un potenziometro. Di seguito vengono riportati i sensori principali del sistema:

- a) *Carico motore* – Il carico motore è la coppia attuata effettivamente e viene rilevato sulla base della quantità di aria introdotta in ogni singolo cilindro mediante due diversi criteri:
 - misura della massa di aria che attraversa il collettore di aspirazione tramite un misuratore di portata (debimetro) basato sul principio dell'anemometro a filo caldo (la variazione della velocità dell'aria determina una variazione della resistenza elettrica a causa della variazione della temperatura del filo);
 - calcolo della portata tramite algoritmi che utilizzano la misura della pressione nel collettore di aspirazione.
- b) *Temperatura* – La temperatura del fluido di raffreddamento motore e dell'aria all'interno del collettore di aspirazione viene misurata con resistori del tipo NTC (*negative temperature coefficient*). Il segnale di tensione in uscita viene trasformato in digitale da un convertitore analogico-digitale (ADC, *analog-to-digital converter*) all'interno della centralina.



- | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 Valvola di intercettazione (<i>Shut off valve</i>) | 19 Carburante (<i>Fuel</i>) |
| 2 Filtro a carbone attivo (<i>Carbon canister</i>) | 20 Sensore pressione serbatoio (<i>Tank pressure sensor</i>) |
| 3 Valvola rigenerazione filtro (<i>Canister purge valve</i>) | 21 Valvola EGR (<i>EGR valve</i>) |
| 4 Sensore pressione collettore aspirazione (<i>Intake manifold pressure sensor</i>) | 22 Attuatore controllo minimo (<i>Idle speed actuator</i>) |
| 5 Controllo valvola a farfalla (ETC, <i>electronic throttle control</i>) | 23 Sensore posizione farfalla (<i>Throttle position sensor</i>) |
| 6 Accumulatore carburante/Iniettore (<i>Fuel rail/Injector</i>) | 24 Diagnostica a bordo (OBD, <i>on-board diagnosis system</i>) |
| 7 Controllo anticipo (<i>Valve timing control</i>) | Sistema senza ricircolo del combustibile (<i>RFLS, returnless fuel supply system</i>) |
| 8 Bobina accensione/candela (<i>Ignition coil/Spark plug</i>) | Ricircolo gas di scarico (EGR, <i>exhaust gas recirculation</i>) |
| 9 Sensore di fase (<i>Phase sensor</i>) | CAN, <i>controller area network</i> |
| 10 Sensore lambda (<i>Lambda sensor</i>) | TCU, <i>transmission control unit</i> |
| 11 Catalizzatore (<i>Catalyst</i>) | 25 Antifurto (<i>Immobilizer</i>) |
| 12 Sensore temperatura (<i>Temperature sensor</i>) | 26 Luce spia malfunzionamento (<i>Malfunction indicator lamp</i>) |
| 13 Sensore lambda a valle (<i>Downstream lambda sensor</i>) | 27 Interfaccia di diagnosi (<i>Diagnosis interface</i>) |
| 14 Interruttore accensione (<i>Ignition switch</i>) | 28 Centralina (ECU, <i>Electronic control unit</i>) |
| 15 Sensore accelerazione telaio (<i>Chassis acceleration sensor</i>) | 29 Aria (<i>Air</i>) |
| 16 Sensore velocità (<i>Speed sensor</i>) | 30 Misuratore portata aria con sensore temperatura (<i>Air mass meter with temperature sensor</i>) |
| 17 Sensore detonazione (<i>Knock sensor</i>) | |
| 18 Modulo pompa carburante (<i>In-tank fuel pump module</i>) | |

Fig. 43.1 - Sistema di controllo di un motore ad accensione comandata che integra iniezione di combustibile e accensione (Robert Bosch, Motronic).



- | | | | |
|---|---------------------------------------|----|-------------------------|
| 1 | Corpo farfallato | 6 | Misuratore portata aria |
| 2 | Filtro carburante | 7 | Sonda lambda |
| 3 | Iniettori e rail | 8 | Sensori |
| 4 | Gruppo pompa alimentazione | 9 | Centralina |
| 5 | Gruppo bobine di accensione e candele | 10 | Pedale acceleratore |

Fig. 43.2 - Componenti del sistema di controllo di un motore ad accensione comandata (Robert Bosch); tra i vari componenti si nota il gruppo iniettori con l'accumulatore (*rail*) di collegamento.

c) *Posizione angolare degli alberi (motore e a camme) e giri motore* – Il segnale della posizione del pistone in ogni singolo cilindro, necessario per poter fasare correttamente i comandi di iniezione e di accensione, è fornito da un sensore di posizione angolare dell'albero motore, poiché il pistone, tramite la biella, è connesso all'albero motore. Questo stesso sensore misura la variazione nel tempo della posizione angolare dell'albero e segnala così la velocità di rotazione dell'albero motore. Un sensore induttivo che si affaccia su una ruota con 60 denti meno 2 calettata sull'albero motore, fornisce queste due indicazioni; la variazione di campo magnetico, dovuta al passaggio della ruota dentata di fronte al sensore, genera una tensione alternata la cui ampiezza è funzione della velocità di rotazione dell'albero motore, mentre i due denti mancanti generano una discontinuità nel segnale di tensione e, dato lo specifico calettamento angolare, indicano la posizione dell'albero per il cilindro numero 1. Un sensore a effetto Hall (formazione di una differenza di potenziale sulle facce opposte di un conduttore elettrico dovuta a un campo magnetico perpendicolare alla corrente elettrica che scorre in esso) identifica invece la posizione dell'albero a camme; questo infatti ruota a una velocità angolare dimezzata rispetto all'albero motore (nei motori a 4 tempi la fase di rinnovo del fluido motore si

verifica ogni due giri dell'albero motore), e il sensore è indispensabile per riconoscere la corsa di compressione/combustione da quella di scarico.

- d) *Rapporto aria/combustibile* – Il sensore di ossigeno o sonda lambda (λ è appunto il rapporto relativo aria/combustibile), di materiale ceramico (ossido di zirconio), è fatto a forma di ditale con ambedue i lati, interno ed esterno, rivestiti da un sottili strati di platino che costituiscono degli elettrodi permeabili al gas (Figura 43.3). Allorché il sensore viene lambito dai gas di scarico si genera una tensione proporzionale al rapporto tra le pressioni parziali di ossigeno all'interno del sensore (a contatto con l'atmosfera e quindi sensibile alla pressione parziale dell'ossigeno contenuto nell'aria) e la pressione parziale dell'ossigeno all'esterno del sensore che è in contatto con i gas di scarico. La caratteristica di questo sensore è di presentare una forte discontinuità di tensione in presenza di valori di ossigeno corrispondenti a una miscela stechiometrica ($\lambda = 1$). I sensori di ossigeno sono due per poter monitorare il sistema segnalandone eventuali malfunzionamenti.
- e) *Detonazione* – Un sensore accelerometrico fissato alla testa del motore rileva le vibrazioni provocate sulla struttura del motore dal forte incremento di pressione in camera di combustione a seguito della detonazione. Poiché è necessario riconoscere chiaramente le vibrazioni innescate dalla detonazione anche nel singolo cilindro i sensori possono essere più di uno.

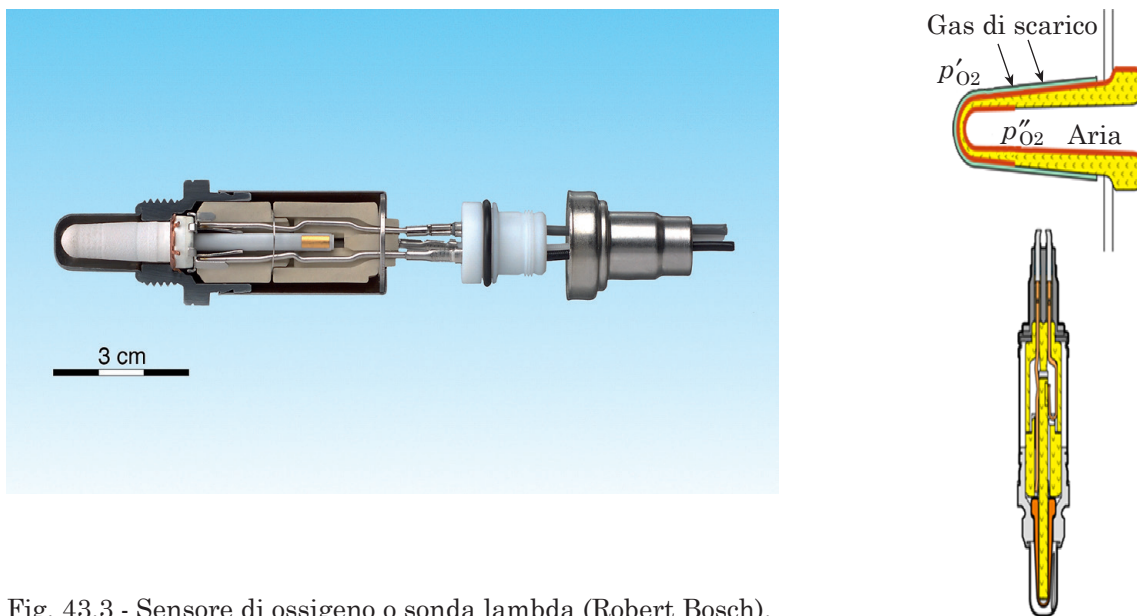


Fig. 43.3 - Sensore di ossigeno o sonda lambda (Robert Bosch).

Di seguito vengono riportati gli **attuatori** principali del sistema:

- a) *Iniettore del combustibile* – L'iniettore elettromagnetico contiene un solenoide che avvolge un pistoncino solidale a un ago in grado di muoversi con alta precisione allorché circola corrente. In posizione di riposo l'ago mantiene chiusa la sede di efflusso del combustibile sotto l'azione di una molla di contrasto; il comando proveniente dal controllo eccita il solenoide, determinando il sollevamento del pistone-ago di circa 100 μm e scoprendo così le sezioni di efflusso per il tempo necessario a fornire la quantità di combustibile voluta in

funzione della sezione di efflusso e del salto di pressione sull'iniettore. Il salto di pressione viene mantenuto costante da un regolatore di pressione a membrana installato su un collettore del combustibile alimentato da una elettropompa immersa nel serbatoio e in grado di fornire una portata fino a $60 \text{ mm}^3/\text{s}$ a una pressione di $0,25 \div 0,35 \text{ MPa}$.

- b) *Accensione* – Con la soluzione della singola bobina per ogni cilindro, collocata direttamente sopra la candela, si raggiunge la massima flessibilità per l'energia di scarica e per la fasatura di accensione.
- c) *Farfalla motorizzata* – L'attuatore farfalla motorizzata consiste in un motore elettrico in corrente continua che, attraverso un meccanismo di riduzione, consente di movimentare il piattello della farfalla stessa. L'albero sul quale è calettato il piattello risente dell'azione di due molle di richiamo. Queste molle agiscono separatamente; l'una esclusivamente sui piccoli angoli, quelli che consentono di gestire il regime di minimo, e l'altra sui grandi angoli. La farfalla motorizzata disaccoppia il movimento della farfalla di regolazione della potenza dal pedale acceleratore. Il conducente continua ad agire sul pedale, ma di fatto comanda un potenziometro il cui segnale perviene alla centralina che interpreta la richiesta del conducente stesso in base a ben definite strategie. Di conseguenza l'effettiva regolazione della potenza viene gestita dalla centralina che invia un comando al motore elettrico di azionamento della farfalla. Al regime di minimo il sistema centralina-farfalla motorizzata, attuando piccoli angoli, garantisce la costanza del regime stesso al variare degli assorbimenti.

La **centralina**, in accordo con la terminologia, è il centro di calcolo e di controllo del sistema di gestione del motore, in particolare iniezione e accensione. Tramite algoritmi specifici essa processa i segnali in entrata, provenienti dai sensori, li utilizza per calcolare i valori in uscita e ne comanda l'attuazione. All'interno, su memoria non volatile (EEPROM), vengono immagazzinati sia i programmi sia i dati di calibrazione specifici per il singolo accoppiamento motore-veicolo. Fisicamente la centralina è un contenitore metallico che incorpora una serie di circuiti stampati elettronici. Un connettore a terminali multipli, fino a 88 e oltre, provvede al collegamento tra centralina e sensori, attuatori e alimentazione elettrica. Gli amplificatori e gli stadi di potenza sono concentrati in una zona specifica, il cui disegno consenta un adeguato smaltimento del calore che il loro funzionamento produce. All'interno della centralina, utilizzando continuamente i vari segnali di lettura dei parametri motore, il microprocessore identifica la richiesta da parte del conducente e calcola in tempo reale (qualche millesimo di secondo):

- la domanda di coppia,
- la corrispondente carica di aria fresca da introdurre nei cilindri,
- la conseguente quantità di combustibile,
- il corretto angolo di accensione.

Accanto a queste funzioni di base, esistono delle strategie specifiche, molte delle quali a circuito chiuso (*closed-loop*), per ottimizzare il funzionamento del motore nelle condizioni più diverse, minimizzando allo stesso tempo le emissioni di inquinanti:

- La strategia di gestione dell'*avviamento motore* nelle varie condizioni ambientali di temperatura e pressione con richiesta di una quantità maggiore di combustibile per formare una pellicola (*film*) di carburante sulle pareti fredde di condotti e cilindri.

- La strategia di controllo delle *fasi di accelerazione e decelerazione* quando le variazioni di pressione nel collettore di aspirazione sono molto rapide e quindi anche lo spessore del film di combustibile sulle pareti è molto variabile. L'introduzione viene incrementata in accelerazione per evitare una miscela troppo povera, mentre viene interrotta in decelerazione per contenere le emissioni allo scarico e aumentare il freno motore.
- Il controllo del *regime di minimo* con l'obiettivo di mantenere costante la velocità di rotazione al variare della temperatura motore e degli assorbimenti degli ausiliari, quali i carichi elettrici, il compressore dell'impianto di condizionamento del veicolo ecc.
- Il controllo a circuito chiuso del valore di λ , che viene mantenuto nell'intorno di 1 (rapporto aria/combustibile stechiometrico) per garantire la massima efficienza di conversione del catalizzatore a 3-vie per l'abbattimento delle emissioni allo scarico.
- Il controllo del sistema di riduzione delle *emissioni per evaporazione* del combustibile, tramite il lavaggio della trappola di carbone attivo che provvede all'assorbimento.
- Il controllo a circuito chiuso della *detonazione* in curva di piena potenza.

Strategie supplementari riguardano il controllo:

- del o dei *variatori della fase* della distribuzione per l'ottimizzazione di coppia, consumo di combustibile ed emissioni;
- di dispositivi che consentono una *lunghezza variabile* dei collettori di aspirazione per l'ottimizzazione della coppia in un più ampio campo di giri;
- della *sovralimentazione* del turbocompressore;
- del *ricircolo dei gas di scarico* (EGR) per la riduzione delle emissioni di ossidi di azoto;
- dell'*iniezione di aria secondaria* allo scarico per la riduzione delle emissioni di idrocarburi incombusti durante il riscaldamento del motore.

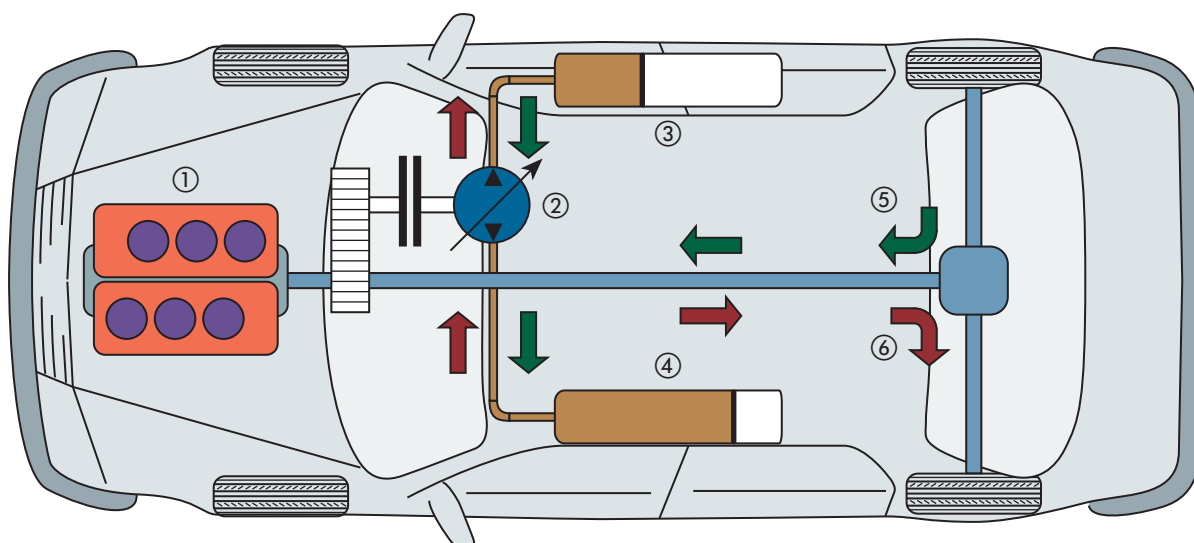
La centralina di controllo del motore può anche comunicare via rete CAN (*controller area network*) con altri sistemi per il controllo elettronico delle funzioni del veicolo per le quali è richiesta una regolazione del motore. Alcuni esempi sono la gestione della trasmissione, il controllo della trazione ecc. Inoltre la legislazione europea sulle emissioni richiede la diagnosi a bordo del veicolo (OBD, *on-board diagnosis*) di ogni eventuale anomalia di componenti e sistemi che possono alterare le emissioni. Il microprocessore controlla quindi sistematicamente la funzionalità dei componenti e, con strategie particolari, anche l'efficienza del catalizzatore, segnalando al conducente i malfunzionamenti tramite l'accensione di una spia sul quadro di bordo del veicolo, segnale che sollecita un controllo in officina.

43.3 Fondamenti e caratteristiche della propulsione ibrida

Il veicolo ibrido è un veicolo che ospita due diversi tipi di propulsori, ad esempio un motore a combustione interna e un motore elettrico, e ha come caratteristica fondamentale quella di poter immagazzinare energia in un accumulatore, le batterie nel caso dell'ibrido elettrico (motore termico e motore elettrico) oppure le bombole di gas nel caso dell'ibrido idraulico (motore termico e motore idraulico). In tal modo la richiesta di potenza del guidatore diviene indipendente dalla potenza fornita dal motore termico; il motore termico infatti può fornire una potenza superiore a quella richiesta, nel qual caso l'energia in eccesso verrà immagazzinata nell'accumulatore, o una potenza inferiore, nel qual caso si utilizzerà parte dell'e-

nergia precedentemente accumulata. La gestione della carica dell'accumulatore è di fondamentale importanza e viene identificata come strategia ibrida (*hybrid policy*). Ovviamente a seconda delle configurazioni, ibrido-elettrico o ibrido-idraulico, è previsto rispettivamente un motore/generatore o un motore/pompa, capace di scaricare o caricare l'accumulatore.

Come esempio di gestione della carica di un accumulatore, consideriamo, per semplicità, la configurazione dello stoccaggio di energia negli accumulatori idropneumatici (*hydropneumatic energy storage*) di un ibrido-idraulico: i due accumulatori idropneumatici ad alta pressione (HPA, *high pressure accumulator*) e bassa pressione (LPA, *low pressure accumulator*) della *Figura 43.4* sono collegati a una macchina reversibile pompa/motore connessa meccanicamente al sistema di trasmissione, che unisce il motore termico al carico, mediante una frizione. In fase di frenata del veicolo la frizione è innestata e la macchina opera come pompa, assorbendo potenza dalla linea e rallentando quindi il veicolo, e il fluido idraulico viene trasferito dall'accumulatore LPA all'accumulatore HPA. Durante la fase di accelerazione assistita, la frizione è ancora innestata e la macchina opera come pompa cedendo potenza alla linea e il fluido passa dall'accumulatore HPA a quello LPA. Nelle fasi non attive la frizione viene disinserita, eliminando il collegamento tra la parte idraulica e il sistema di trasmissione e le relative perdite energetiche.



- | | |
|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| 1 Motore termico (<i>Engine</i>) | 4 Accumulatore ad alta pressione HPA (<i>High pressure accumulator</i>) |
| 2 Pompa/Motore (<i>Pump/Motor</i>) | 5 Modo recupero (<i>Regeneration mode</i>) |
| 3 Accumulatore a bassa pressione LPA (<i>Low pressure accumulator</i>) | 6 Potenza assistita (<i>Power assisted mode</i>) |

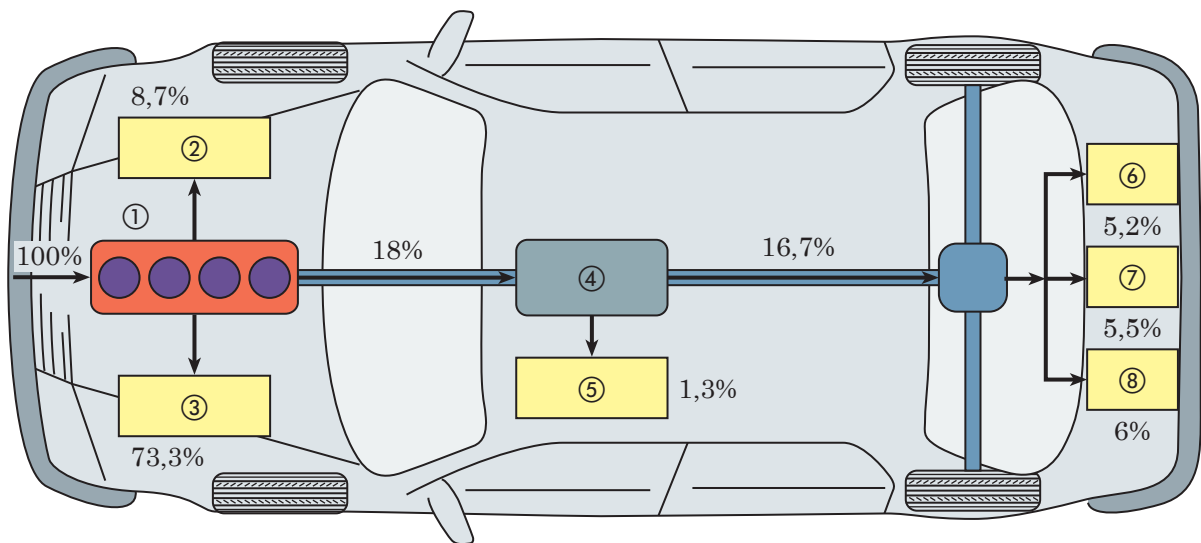
Fig. 43.4 - Schema di un circuito con accumulatore di energia idropneumatico.

L'esempio mostra come, in funzione delle condizioni di esercizio del veicolo, i due diversi motori dell'ibrido contribuiscano in modo diverso ma complementare alla propulsione del veicolo. Il tutto a spese di un indubbio aggravio dei costi poiché, oltre al motore a combustione interna, abbiamo adesso un altro motore e soprattutto un sistema di accumulo di

energia ingombrante e costoso. Ma per quali vantaggi? In particolare nel caso dell'ibrido-elettrico che, tra i diversi ibridi, è quello sul quale si sono concentrate le applicazioni.

In primo luogo occorre riconoscere che (*Figura 43.5*) la potenza di un motore termico subisce, su un percorso standard cittadino, un decadimento estremamente pronunciato della potenza disponibile da parte del combustibile con un rendimento finale alle ruote del 16,7%. Se lo stesso percorso fosse fatto da un veicolo a propulsione puramente elettrica (EV, *electric vehicle*) il rendimento di conversione dell'energia sarebbe stato molto più alto (62%) perché dato dal prodotto di:

- 83% per l'azionamento elettrico comprendente la macchina elettrica e l'apparecchiatura elettronica di conversione e controllo;
- 93% della trasmissione meccanica;
- 80% per una batteria elettrochimica di alta qualità.



- | | |
|---------------------|------------------------------|
| 1 Motore termico | 5 Perdite nella trasmissione |
| 2 Perdite al minimo | 6 Resistenza aerodinamica |
| 3 Perdite motore | 7 Resistenza di rotolamento |
| 4 Trasmissione | 8 Accelerazioni |

Fig. 43.5 - Energia trasmessa dal motore a benzina alla trasmissione e quindi alle ruote del veicolo in un percorso cittadino standard; nel caso del motore a gasolio, l'energia che entra nella trasmissione è pari al 22% invece del 18%.

In presenza di un sistema di stoccaggio dell'energia, la propulsione in puro elettrico consente poi il recupero di una parte consistente della perdita dell'energia cinetica di frenatura e di annullare le perdite al minimo.

Mettiamo adesso insieme le due sorgenti di energia termica ed elettrica nel veicolo ibrido (*Figura 43.6*): oltre al motore termico connesso alla trasmissione mediante la frizione, sono presenti i componenti della generazione di potenza elettrica composti dall'accumulatore (le batterie a nickel-metal-idruri che vengono sostituite da quelle agli ioni di

litio ad alta tensione), l'inverter^{43.1} e il motore elettrico (di solito una macchina sincrona a magneti permanenti con alta densità di potenza); questa catena viene percorsa anche nel verso opposto con la macchina elettrica che funziona da generatore e, attraverso l'inverter, ricarica l'accumulatore.

L'assistenza fornita dalla sorgente elettrica consente di far funzionare il motore termico nelle condizioni di minor consumo di combustibile (e quindi di minori emissioni di CO₂). Ad esempio (*Figura 43.7*), tutte le volte che lo stato di carica (SOC, *state of charge*) della batteria è al di sopra di un certo livello, si può mantenere, al di sotto di una determinata soglia di potenza (5 kW nel caso della figura) e/o velocità, il funzionamento in puro elettrico evitando così che il motore termico debba operare in zone di funzionamento a basso carico dove i rendimenti sono estremamente modesti. Altre volte l'ibridazione può venire utilizzata per evitare di far lavorare il motore termico nei transitori di velocità o in zone del piano quotato a elevate concentrazioni di inquinanti; al limite, il motore termico può essere disinserito e il veicolo può localmente funzionare in elettrico puro con zero emissioni.

Anche nella gestione della coppia motrice l'ibridazione dà un contributo essenziale al motore termico; il limite maggiore del motore a combustione interna è infatti dovuto a una curva di coppia che, essendo funzione della velocità di rotazione, diviene importante solo ai

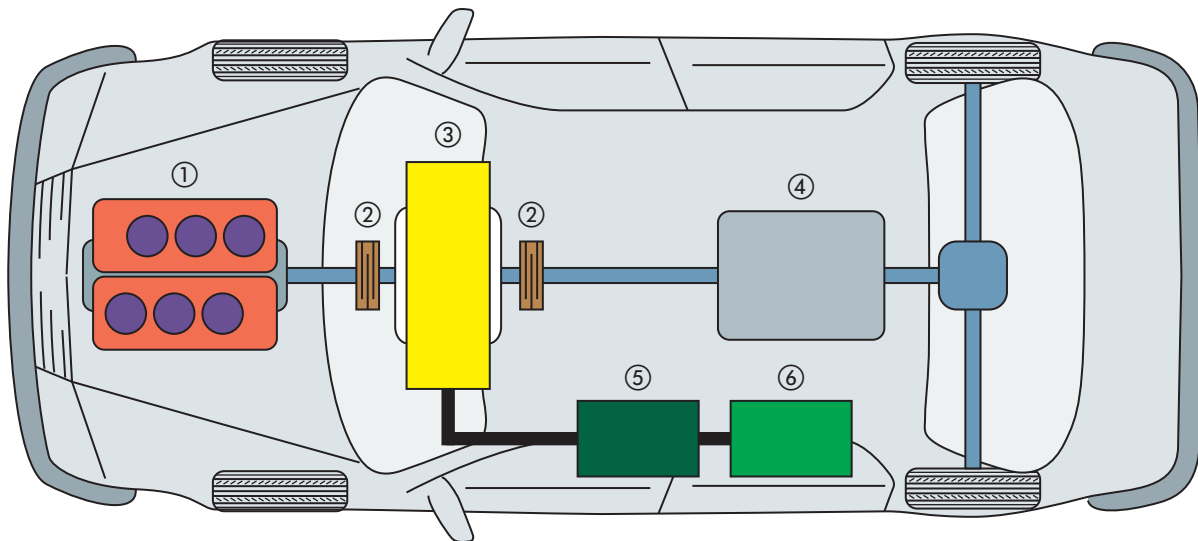
43.1 - Invertitori e convertitori sono combinati insieme in un'unità per gestire i circuiti di potenza e di carica degli accumulatori nei veicoli ibridi.

Un invertitore (*inverter DC-AC*) è un dispositivo elettrico che converte l'elettricità fornita da una sorgente in corrente continua (DC, *direct current*) in corrente alternata (AC, *alternating current*) a una tensione adeguata per l'applicazione desiderata. Il flusso della corrente continua fornita, ad esempio, dalla batteria del veicolo ibrido viene inviato a un avvolgimento primario di un trasformatore attraverso un commutatore elettronico (generalmente una serie di transistor), che ne cambia la direzione con una frequenza regolare (la carica elettrica che passa nell'avvolgimento primario, viene fatta passare in modo alternato prima in una direzione e poi in quella opposta). Questo flusso alternato (avanti e indietro) di elettricità genera una corrente alternata nel circuito dell'avvolgimento secondario del trasformatore, a una tensione determinata dal rapporto tra le spire dei due avvolgimenti. Questa corrente alternata è in grado di alimentare il motore elettrico del veicolo.

L'inverter DC-AC include normalmente anche la funzione di convertitore di tensione (*converter*), realizzata con l'aiuto del trasformatore che cambia la tensione (*voltage*) della sorgente di potenza elettrica. La tensione alternata può essere generata a frequenza fissa o variabile, in funzione delle applicazioni; il motore elettrico a corrente alternata sincrono, utilizzato in prevalenza sui veicoli elettrici o ibridi, utilizza la frequenza variabile della sua alimentazione per regolare la sua velocità.

Nel caso in cui si utilizza un motore a corrente continua, occorre completare l'inverter con un dispositivo a diodi che raddrizza la tensione alla tensione desiderata, per generare potenza continua.

Un invertitore/convertitore, che per semplicità chiamiamo inverter DC/AC, riunisce in una singola unità i due dispositivi citati sopra (passaggio da DC ad AC e regolazione di tensione). L'inverter viene utilizzato nei veicoli ibridi e in quelli elettrici per gestire l'energia che fluisce dalla batteria al motore di propulsione elettrica. Unitamente al raddrizzatore e al sistema integrato di controllo di carica integrato, l'inverter AC-DC fornisce invece corrente al pacco batterie per ricaricarlo durante la frenatura rigenerativa. L'inverter riesce così a far lavorare insieme sistemi diversi per livelli di tensione e per tipo di corrente: sia i veicoli ibridi che quelli elettrici usano infatti batterie in corrente continua a relativamente bassa tensione (da 120 a 210 V) ma usano motori/generatori in corrente alternata ad alto rendimento con tensioni elevate (da 300 a 650 V). A causa delle elevate correnti che percorrono le resistenze elettriche associate ai trasformatori, semiconduttori e agli altri dispositivi elettrici ed elettronici, l'impianto elettrico del veicolo ibrido e in particolare l'inverter inevitabilmente emettono quantità considerevoli di calore che devono venire asportate con un sistema di raffreddamento dedicato, completo di pompa e radiatori, interamente indipendente dal sistema di raffreddamento del motore termico.



- 1 Motore termico (ICE, *internal combustion engine*)
- 2 Frizione (*clutch*)
- 3 Unità motore/generatore elettrico (MGU, *motor/generator unit*)
- 4 Cambio ad alta efficienza (*transmission*)
- 5 *Inverter*
- 6 Batteria (*battery*).

Fig. 43.6 - Propulsione ibrida applicata al caso di un ibrido-parallelo, dove cioè le due sorgenti di energia termica ed elettrica contribuiscono in modo indipendente l'una dall'altra a fornire energia motrice al veicolo ibrido (HEV, *hybrid electric vehicle*).

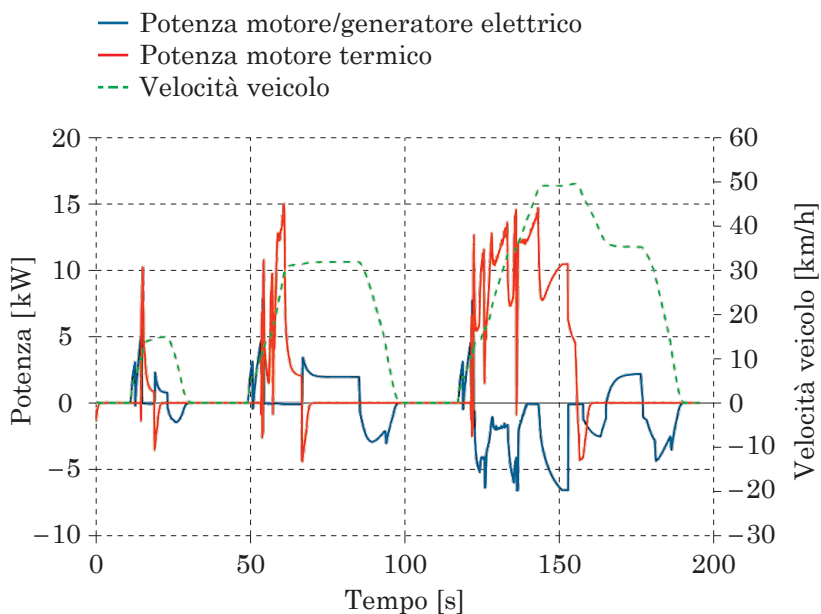


Fig. 43.7 - Funzionamento dell'ibrido in elettrico per richiesta di potenza inferiore a 5 kW durante un percorso cittadino (F. Millo et al., SAE 2009-24-0064).

regimi elevati lontani dal minimo, mentre il motore elettrico è in grado di fornire la coppia massima a una velocità di rotazione uguale a zero (*Figura 43.8*). L'ibridazione consente quindi di ridurre la cilindrata totale del motore a combustione interna (*downsizing*) facendo così aumentare il rendimento e mantenendo le prestazioni del veicolo a livelli ancora accettabili, grazie alla coppia addizionale fornita dalla sorgente elettrica.

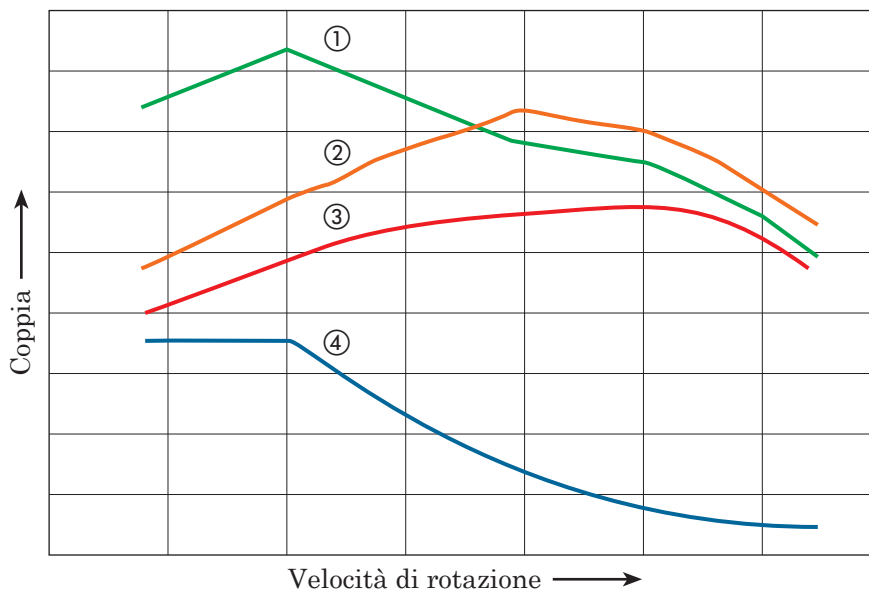


Fig. 43.8 - Curve di coppia per un motore termico da 1,6 litri di cilindrata (2), per questo stesso motore a cui è stata ridotta la cilindrata a 1,2 litri (3), per una macchina elettrica da 15 kW (4) e infine la curva di coppia risultante della propulsione ibrida (1) [Robert Bosch].

43.4 Funzioni della propulsione ibrida

Compito del sistema di controllo e gestione (*control and management system*) del veicolo ibrido è quello di controllare i componenti della propulsione ibrida e di gestire l'accumulo di energia e la distribuzione di potenza tra i due diversi motori. La modalità secondo la quale nel veicolo ibrido il motore a combustione interna, la macchina elettrica che può lavorare come motore e come generatore e l'accumulatore di energia interagiscono definisce differenti modi operativi per assolvere alle funzioni principali rappresentate da:

- *Start-stop* – Il motore termico viene temporaneamente disinserito nelle fermate e viene automaticamente riavviato non appena il guidatore voglia partire.
- *Frenatura rigenerativa (regenerative braking)* – La macchina elettrica recupera il lavoro richiesto per frenare il veicolo convertendone l'energia cinetica in energia elettrica che viene immagazzinata nell'accumulatore di energia (le batterie del veicolo).
- *Propulsione ibrida (hybrid driving)* – Sono quegli stati in cui l'energia motrice viene generata in parte dal motore termico e in parte dal motore elettrico. La macchina elettrica può operare come generatore o come motore. Quando il motore termico viene utilizzato in modo da generare un valore di energia superiore alle necessità del veicolo (ad esempio in fase di rilascio dell'acceleratore), l'energia in eccesso viene inviata al generatore che

la converte in energia elettrica da immagazzinare nell'accumulatore; questa energia può poi essere utilizzata dal motore elettrico, da solo o insieme a quella fornita dal motore termico per ottenere la potenza propulsiva desiderata.

- *Propulsione termica* – Nella marcia regolare con richieste di potenze medio-alte del motore, il veicolo è azionato solo dal motore termico, come nel veicolo tradizionale.
- *Propulsione in solo elettrico (purely electric driving)* – Il moto del veicolo è affidato al solo motore elettrico, mentre il motore termico viene spento e scollegato dalle ruote. In questo stato il veicolo può muoversi senza alcun rumore, tranne quello del rotolamento dei pneumatici e senza generare emissioni a livello locale.
- *Collegamento alla rete elettrica (grid connected hybrid)* – È possibile la ricarica degli accumulatori dall'esterno tramite la rete elettrica. Questo tipo di ibrido dispone di una notevole autonomia in pura modalità elettrica a prezzo di un pacco batterie di notevoli dimensioni, più pesante e anche più costoso. Richiede un tempo considerevole di ricarica ma offre il vantaggio di realizzare spostamenti significativi, (25 ÷ 40 km) evitando emissioni di CO₂ nei brevi tragitti casa-lavoro e rientro (*commuting*).

In base alle funzioni citate sopra, i veicoli vengono suddivisi in ibrido:

- *Minimo o microibrido (micro-hybrid)* – Sono presenti le funzioni start-stop e la frenatura rigenerativa parziale, mentre nelle condizioni operative normali funziona come un veicolo termico.
- *Medio (mild hybrid)* – Oltre alle funzioni precedenti con un maggior recupero di energia cinetica, la macchina elettrica, che opera sia come generatore che come motore, è di maggior potenza e assiste il motore termico nella propulsione del veicolo. Nel momento in cui il motore elettrico assiste quello termico, allora si realizza veramente la propulsione in modo ibrido, mentre nell'utilizzo del veicolo a velocità costante (*cruise control*) il veicolo ibrido funziona in solo modo termico. Non è però possibile la marcia del veicolo nella modalità puramente elettrica poiché la dimensione della batteria è limitata (1 ÷ 2 kWh) e consente solo manovre a bassa velocità e gestione dei transitori in accelerazione.
- *Completo (full hybrid)* – Oltre alle funzioni dell'ibrido minimo e di quello medio, può operare su brevi distanze con prestazioni limitate in modalità puramente elettrica e con il motore termico scollegato.
- *A spina (plug-in hybrid)* – L'ibrido dotato di una batteria adeguata a brevi missioni in modalità elettrica può essere collegato alla rete elettrica, ad esempio tramite una normale presa, per effettuare la ricarica. Questa configurazione adotta un pacco di batterie maggiorato (4 ÷ 6 kWh) per coprire distanze significative nel funzionamento puramente elettrico. Scaricata la batteria il veicolo opera come un full hybrid; la batteria non viene mai ricaricata dal motore/generatore presente a bordo veicolo perché peggiorerebbe molto i consumi e le emissioni di CO₂.

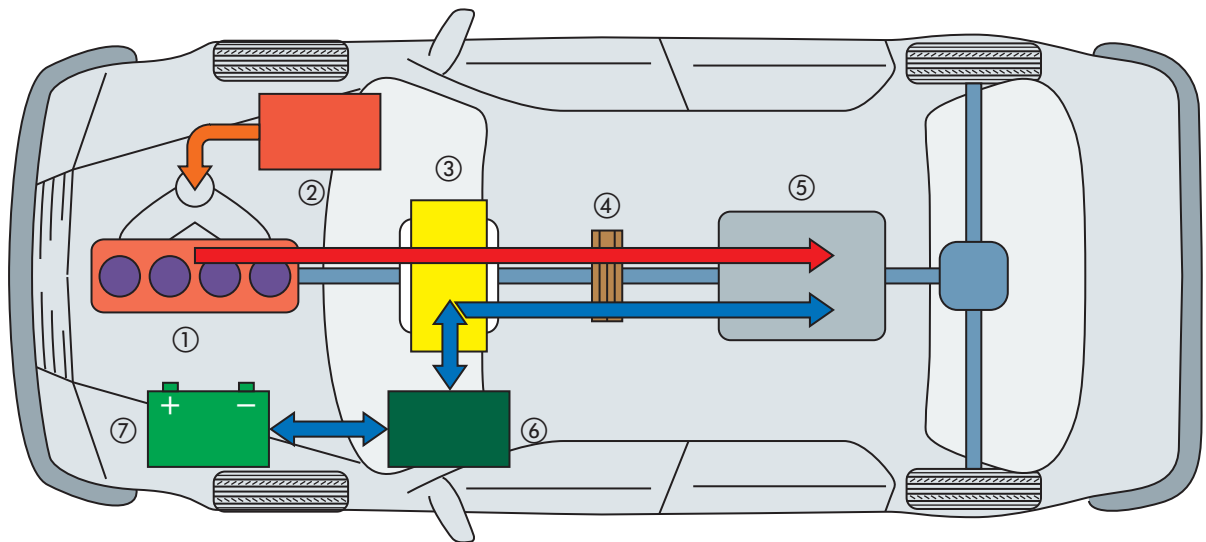
/// 43.5 Configurazioni di veicoli ibridi

Vi sono diversi modi di configurare motore termico, trasmissione e macchina elettrica nei veicoli ibridi. Queste configurazioni possono essere classificate in funzione dei flussi di energia in: ibrido-parallelo (*parallel*), ibrido-serie (*series*) e ibrido con ripartizione di potenza (*power-split*). Oggi sono prodotte tutte e tre queste tipologie di ibridi, di cui si possono

citare, come esempi, l'ibrido-parallelo (Honda Insight), l'ibrido serie (Opel Ampera) e l'ibrido *power-split* (Toyota Prius). L'ibrido serie è predisposto per la funzione plug-in; le altre configurazioni devono invece prevedere adattamenti specifici (batteria e sistema di gestione).

43.5.1 Ibrido-parallelo

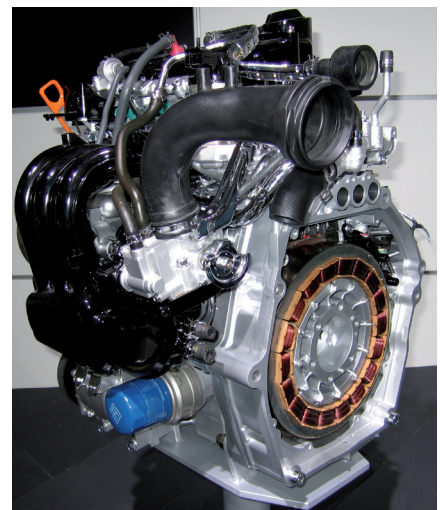
Nel sistema ibrido-parallelo, il motore termico e il motore elettrico sono direttamente collegati alla trasmissione; le energie provenienti dalle due sorgenti, termica ed elettrica, vengono così utilizzate parallelamente e la loro somma dà il lavoro speso nella trazione del veicolo (Figure 43.6 e 43.9). L'unità motore/generatore può lavorare come generatore



- | | |
|---------------------------|------------|
| 1 Motore termico | 5 Cambio |
| 2 Serbatoio | 6 Inverter |
| 3 Unità motore/generatore | 7 Batteria |
| 4 Frizione | |

Fig. 43.9-a - Configurazione di ibrido-parallelo.

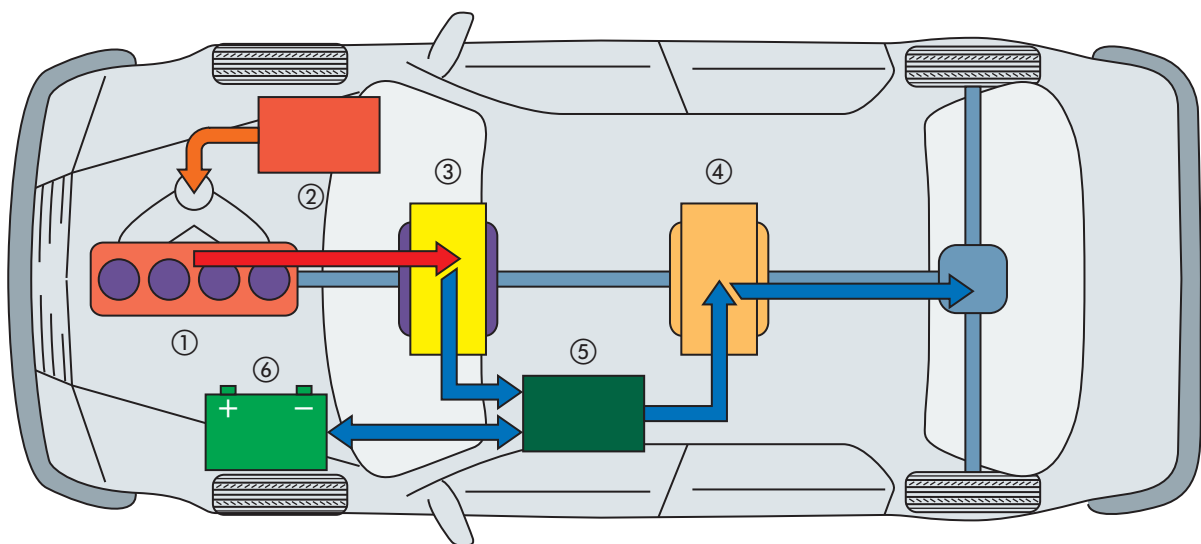
Fig. 43.9-b - Honda Insight è un ibrido-parallelo medio: motore ad accensione comandata a tre cilindri da un 1 litro di cilindrata, motore elettrico a corrente continua da 10 kW di potenza collegato direttamente all'albero del motore termico, cambio manuale a 5 rapporti, batterie al nickel-metal-idruri con 144 V di tensione e 22 kg di massa complessiva.



per ricaricare le batterie. Il vantaggio principale di questo sistema è quello di mantenere l'architettura di base del veicolo convenzionale, aggiungendo un solo motore elettrico e il pacco batterie. L'ibrido-parallelo può rivestire tutte e tre le configurazioni: ibrido minimo, medio e completo.

43.5.2 Ibrido-serie

Nell'ibrido-serie (*Figura 43.10*) il motore termico aziona solo il generatore elettrico. La potenza elettrica così generata è disponibile, insieme a quella del pacco batterie, al motore elettrico che viene utilizzato per la propulsione del veicolo. Un ibrido serie è sempre un ibrido completo poiché può far fronte a tutte le funzioni: start-stop, frenatura rigenerativa, propulsione ibrida, quando l'energia è fornita in parte dal generatore collegato al motore elettrico e in parte dalla batteria, e propulsione elettrica quando l'energia è fornita solo dalla batteria. A causa del fatto che non vi è collegamento tra motore termico e ruote di trazione, la trasmissione convenzionale (plurimarce) è sostituita da una trasmissione semplificata (2 o 3 marce) che collega il motore elettrico con le ruote. Il vantaggio principale dell'ibrido-serie è di poter scegliere il miglior punto di funzionamento del motore termico nei riguardi del consumo di combustibile e delle emissioni. Svantaggi sono dovuti al fatto che la doppia conversione, da energia meccanica del motore a energia elettrica e poi da energia elettrica a energia meccanica alle ruote, richiede due macchine elettriche della stessa classe di potenza con perdite complessive più elevate di quelle presenti nel caso di un trasferimento puramente meccanico affidato a una trasmissione. Il sistema ibrido serie non prevede la modalità puramente termica.



- 1 Motore termico
- 2 Serbatoio
- 3 Alternatore

- 4 Motore elettrico
- 5 Inverter
- 6 Batteria

Fig. 43.10 - Configurazione di ibrido-serie.

Il sistema ibrido-serie, è stato utilizzato in applicazioni di nicchia, come le locomotive diesel-elettriche e gli autobus per città; ora sta diffondendosi anche sui veicoli elettrici a batteria, la cui autonomia (*range*) viene estesa (*extended*) dall'impiego di un motogeneratore termico, utilizzato appunto come *range extender* (Figura 43.11).



Fig. 43.11-a - Vettura Lohner-Porsche Mixte (1902); ibrido-serie sviluppato da Ferdinand Porsche: 4 motori elettrici sui mozzi delle ruote, 1 motore a combustione interna Daimler, batterie al piombo.



Fig. 43.11-b - Autobus ibrido Citaro a Stoccarda (2009): ibrido-serie, 4 motori elettrici sui mozzi delle ruote degli assi medio e posteriore, potenza elettrica 320 kW, motore a combustione interna Daimler con cilindrata di 4,8 litri notevolmente ridotta rispetto a quella del motore termico originale per autobus che aveva una cilindrata di 12 litri.

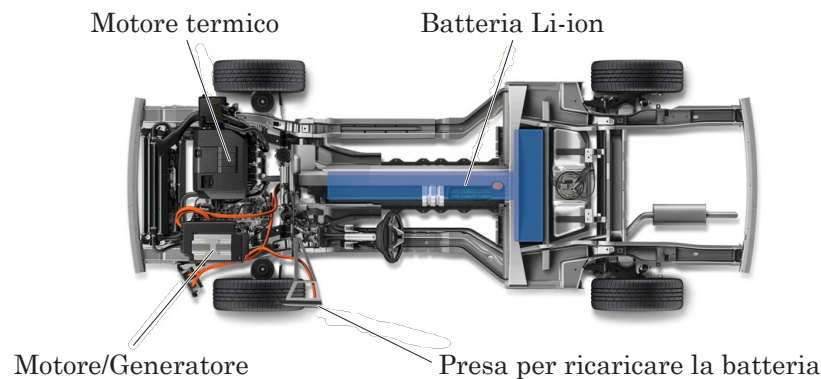
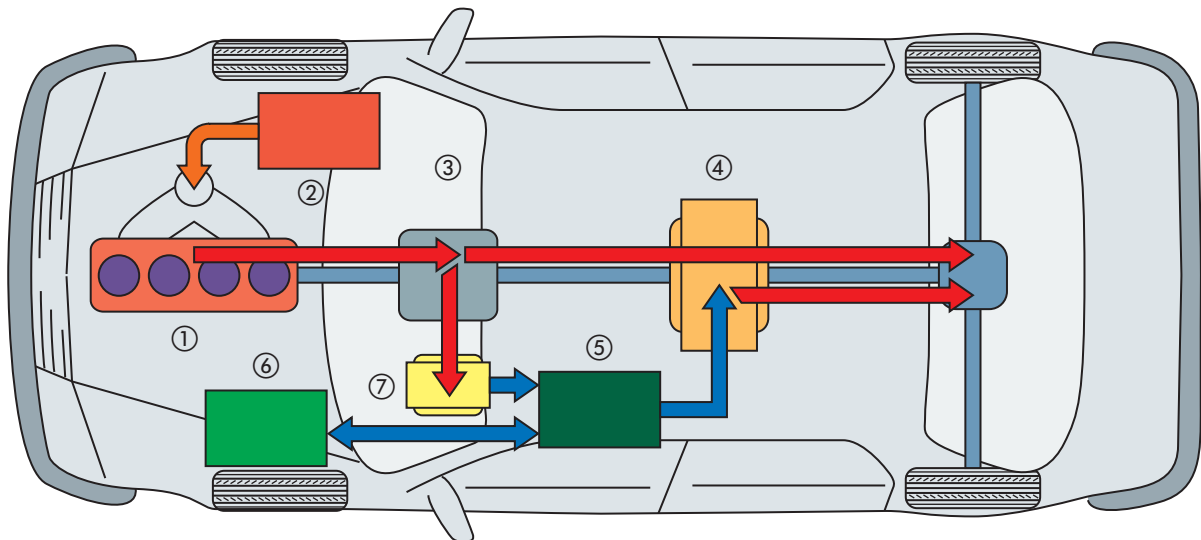


Fig. 43.11-c - Ibrido-serie General Motors su due diverse vetture: Opel Ampera per mercato europeo e Chevrolet Volt per quello americano.

43.5.3 Ibrido con ripartizione di potenza

I veicoli ibridi con ripartizione di potenza combinano caratteristiche di veicoli ibridi-paralleli e ibridi-serie. Parte della potenza del motore termico viene convertita in potenza elettrica, mentre la parte rimanente insieme a quella del motore elettrico, alimentato a batteria, viene utilizzata come potenza alle ruote. L'ibrido a ripartizione di potenza è sempre un ibrido completo poiché sono possibili tutte le funzioni di start/stop, frenatura rigenerativa, propulsione ibrida, propulsione termica e propulsione elettrica.

L'elemento centrale del sistema (*Figura 43.12*) è la trasmissione epicicloidale che è collegata, mediante tre alberi, al motore termico e alle due macchine elettriche consentendo di regolare la velocità di rotazione del motore termico in modo indipendente da quella del veicolo. Il cambio è a variazione continua di velocità con controllo elettronico (E-CVT, *electronic continuously variable transmission*); essendo realizzato in questo modo, non richiede un gruppo frizione-cambio convenzionale. Parte della potenza del motore termico viene trasmessa dalla trasmissione epicicloidale, via un percorso meccanico, direttamente alle ruote, mentre la parte rimanente è trasmessa, via due diversi percorsi elettrici e con una doppia conversione di energia, sempre alle ruote del veicolo.

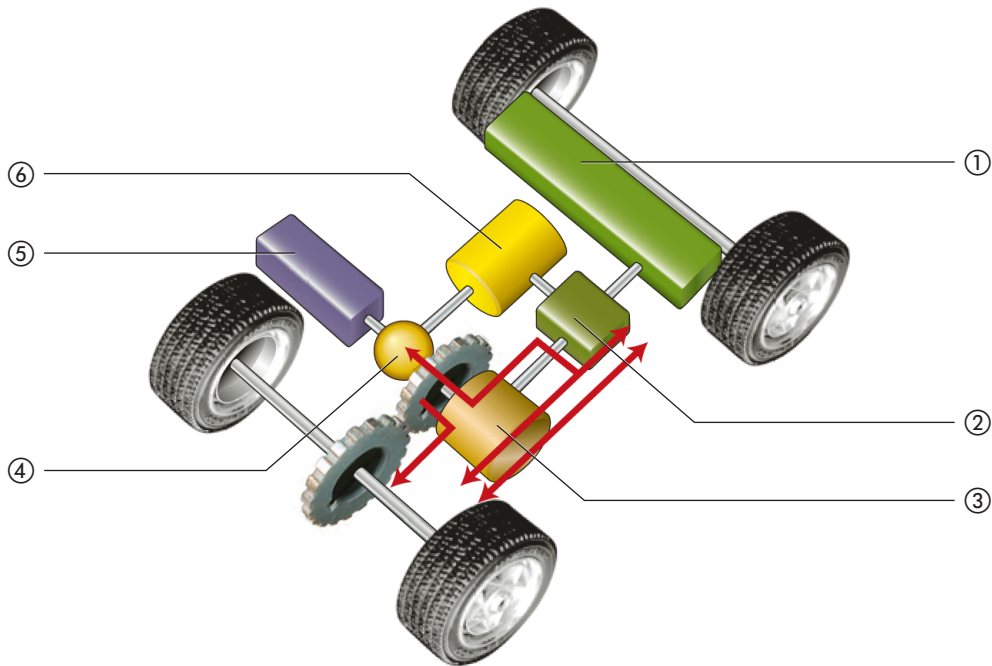


- | | |
|------------------------------|---------------|
| 1 Motore termico | 5 Inverter |
| 2 Serbatoio combustibile | 6 Batteria |
| 3 Trasmissione epicicloidale | 7 Alternatore |
| 4 Motore elettrico | |

Fig. 43.12-a - Configurazione di ibrido con ripartizione di potenza.

La trasmissione elettrica della potenza può avvenire, come nell'ibrido serie, in presenza di una bassa richiesta di potenza. Con richieste di potenza maggiore viene utilizzata la trasmissione meccanica, con la possibilità di utilizzare solo la propulsione termica a velocità medio-alte. A differenza di altri sistemi ibridi serie-parallelo, non è tuttavia possibile passare arbitrariamente dai percorsi relativi alla trasmissione meccanica e a quella elettrica,

ma, in funzione della configurazione della trasmissione epicicloidale, sono possibili solo determinate combinazioni di ripartizione della potenza, che appunto consentono di ottenere un sostanziale risparmio di combustibile a bassa e media velocità dove più sentito è l'aiuto che può essere dato dalla propulsione ibrida.



- 1 Batterie ad alta tensione
- 2 Inverter
- 3 M/G-2
- 4 Trasmissione epicicloidale
- 5 Motore termico
- 6 M/G-1

Fig. 43.12-b - Ibrido *power-split* Toyota Prius: motore ad accensione comandata da 1,5 litri di cilindrata con fasatura variabile delle valvole di aspirazione (ciclo Atkinson [http://en.wikipedia.org/wiki/Atkinson_cycle] con rendimento elevato ma prestazioni ridotte), trasmissione epicicloidale come ripartitore di potenza, motore/generatore M/G-1 per la ricarica degli accumulatori durante la marcia e in grado di riavviare il termico, un secondo motore/generatore M/G-2 da 50 kW per la trazione delle ruote anteriori e la frenatura rigenerativa, inverter per l'alimentazione in corrente alternata dei motori/generatori, batterie al nickel-metal-idruri con 39 kg di massa complessiva.

/// 43.6 Prospettive della trazione ibrida

Il componente critico del veicolo che in tutto o in parte si affida al motore elettrico per la propulsione è l'accumulatore per lo stoccaggio dell'energia elettrica. La densità di energia [Wh/kg] di un

combustibile, ad esempio una benzina immagazzinata nel serbatoio dell'automobile con potere calorifico inferiore $LHV = 43,2 \text{ MJ/kg}$, è pari a $(43.200.000 \text{ Ws/kg}) / (3600 \text{ s/h}) = 12.000 \text{ Wh/kg}$.

Le attuali batterie hanno densità di energia estremamente più basse: 35 Wh/kg della batteria al piombo, 75 Wh/kg di quella al Nickel-metal-idruri (Ni-MeH) e 140 ÷ 170 Wh/kg di quella agli ioni di litio (Li-ion). Inoltre il costo delle batterie più evolute agli ioni di litio, anche nel caso di alti volumi di produzione, è ancora elevato e si aggira attorno a 500 US\$/kWh^{43.2}. Così, se si assume un consumo di energia di un veicolo che funzioni in solo elettrico pari a 14 kWh/100 km (è il lavoro speso da un veicolo medio su un percorso standard urbano) e si volesse disporre di un'autonomia di 400 km, analoga a quella che viene richiesta al veicolo termico, si dovrebbe dimensionare un pacco batterie di capacità pari a 56 kWh con un costo di 28.000 US\$, costo che è solo parzialmente recuperato dal minor costo dell'energia durante la vita del veicolo, ammesso che non sia necessario sostituire il pacco batterie durante la vita del veicolo. Un pacco batterie agli ioni di litio da 56 kWh di capacità ha una massa di 400 kg (presa una densità di energia di 140 Wh/kg) e un volume di circa 400 litri (0,4 m³) equivalente a quello del bagagliaio di un'autovettura media. Il problema delle batterie costituisce l'ostacolo principale alla diffusione del veicolo che voglia fare affidamento sulla propulsione in elettrico^{43.3} per applicazione che richiedano autonomie elevate e cioè al di fuori dell'ambito urbano.

Un problema diverso, ma che affligge tutti i veicoli, indipendentemente dal tipo di propulsione, è la necessità di limitare le emissioni di gas a effetto serra e in particolare le emissioni di biossido di carbonio (95 g CO₂/km, limite dell'Unione Europea dal 2020 allo scarico delle autovetture). Ma la riduzione delle emissioni di CO₂ va vista in modo globale tenendo conto anche dell'energia spesa a monte dell'impiego su veicolo: accanto al CO₂ emesso allo scarico del veicolo, dal serbatoio alla ruota (*tank-to-wheel*), va aggiunto il CO₂ richiesto per produrre il combustibile, dal pozzo al serbatoio (*well-to-tank*), in modo da ottenere l'emissione complessiva di CO₂ dal pozzo alla ruota (*well-to-wheel*). Nel caso di un combustibile fossile come la benzina occorrerà allora aggiungere al CO₂ emesso allo scarico del veicolo il CO₂ speso nell'estrazione/raffinazione del petrolio e nella distribuzione della benzina, mentre nel caso di un veicolo che si muova in puro elettrico si dovrà tener conto del CO₂ speso per generare l'energia elettrica (dato il mix energetico medio dell'Unione Europea, la generazione di un kWh di elettricità dà luogo all'emissione di 467 g CO₂/kWh). In questo senso anche il veicolo a propulsione puramente elettrica dà un contributo significativo alle emissioni CO₂ a meno che la produzione di energia elettrica sia basata su fonti rinnovabili (*Figura 43.13*).

43.2 - Oltre al costo delle batterie, andrebbe considerato un costo energetico aggiuntivo per la loro produzione compreso tra 35.300 MJ e 57.800 MJ a seconda della capacità della batteria; il veicolo in puro elettrico nasce perciò con un carico di emissioni corrispondente a un percorso di 15.000 ÷ 27.000 km fatto da un veicolo termico con i 1100 ÷ 1800 litri di benzina la cui energia corrisponde a 35.300 MJ ÷ 57.800 MJ. Bisognerebbe infine considerare i costi di smaltimento a fine vita della batteria, costi non certo trascurabili.

43.3 - Andrebbe considerato anche il veicolo a pila a combustibile (*Fuel Cell*), veicolo elettrico che utilizza l'idrogeno per produrre a bordo l'elettricità utilizzata per la propulsione. Mira a offrire la stessa versatilità di utilizzo dei veicoli attuali, ma le tecnologie ancora costose e la necessità di nuove infrastrutture per la produzione e la distribuzione dell'idrogeno (è a zero emissioni solo se prodotto da fonti rinnovabili), ne fanno prevedere una possibile introduzione sul mercato solo dopo il 2020.

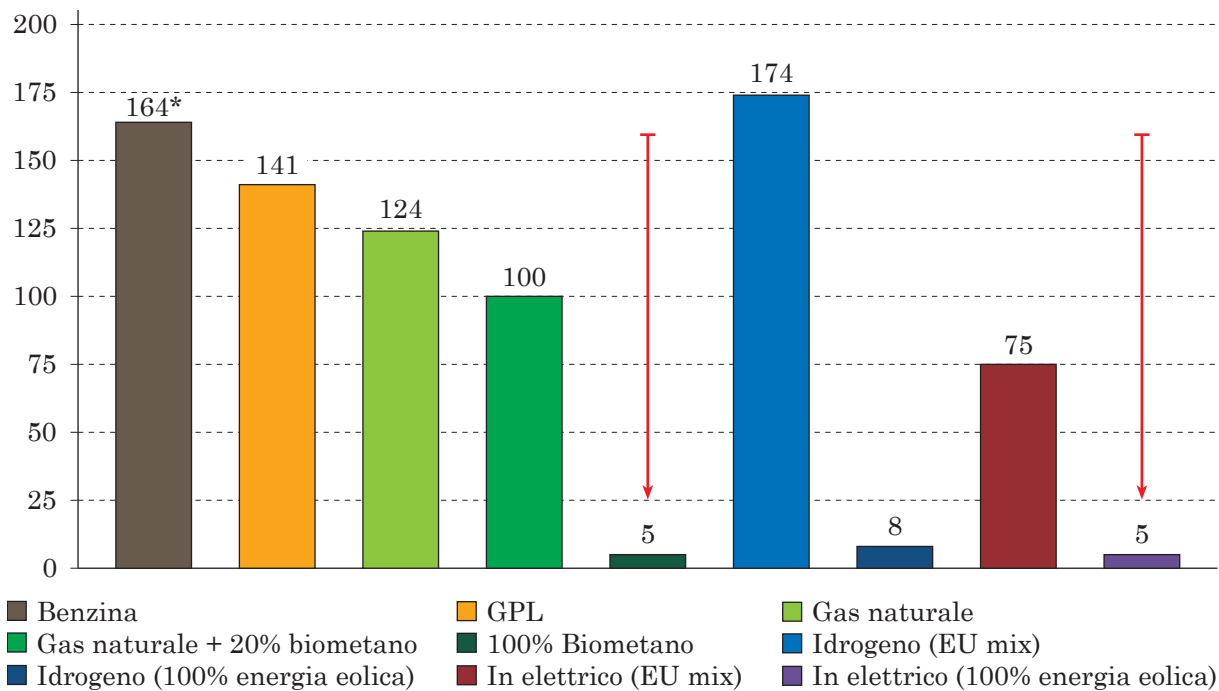


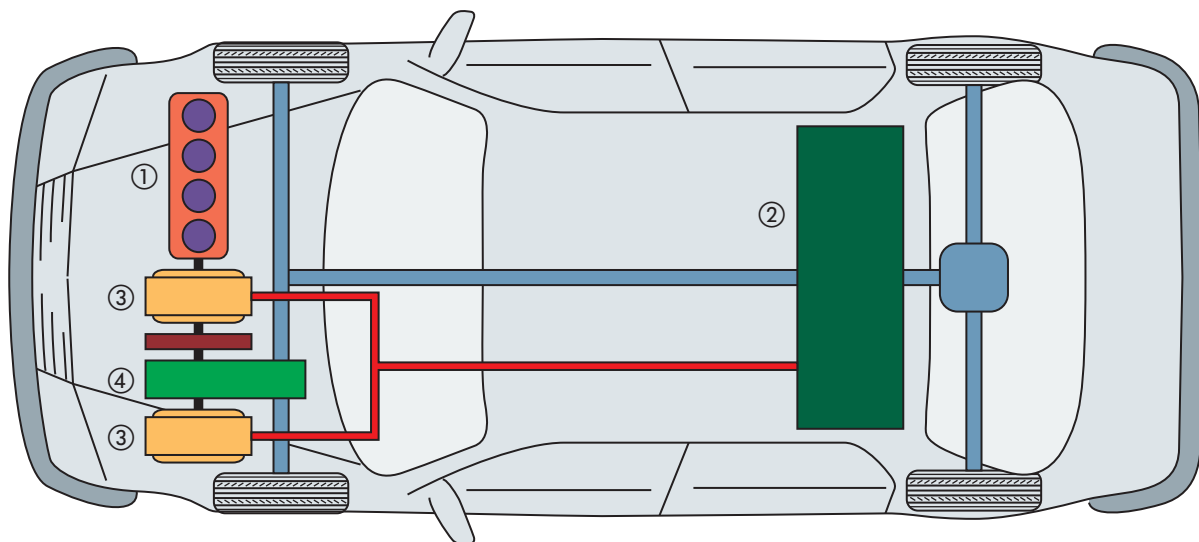
Fig. 43.13 - Emissioni complessive dal pozzo alla ruota (*well-to-wheel*) di biossido di carbonio (CO₂) in g/km per vari combustibili; per un combustibile non fossile si fa riferimento a un valore di CO_{2-eq} equivalente alle emissioni di gas a effetto serra di quel dato combustibile.

(*) Veicolo di riferimento: a benzina con emissioni di CO₂ dal serbatoio alla ruota (*tank-to-wheel*) di 140 g/km.

Il veicolo ibrido con un carico di batterie limitato, ad esempio con capacità da 1 a 2 kWh sufficiente a immagazzinare l'energia elettrica generata dal motore o dal recupero dell'energia di frenata, rappresenta una soluzione; le batterie alimentano poi il motore elettrico o per erogare potenza supplementare a bassa velocità o per gestire l'avvio e l'arresto del motore termico al minimo. Su percorsi urbani il veicolo ibrido consente una riduzione del consumo di combustibile del 25 ÷ 30% rispetto al veicolo con motore a benzina convenzionale. Alle medie velocità (missioni extraurbane) il vantaggio si riduce notevolmente, mentre alle velocità elevate (missioni autostradali) il propulsore ibrido consuma tendenzialmente di più del motore a benzina convenzionale.

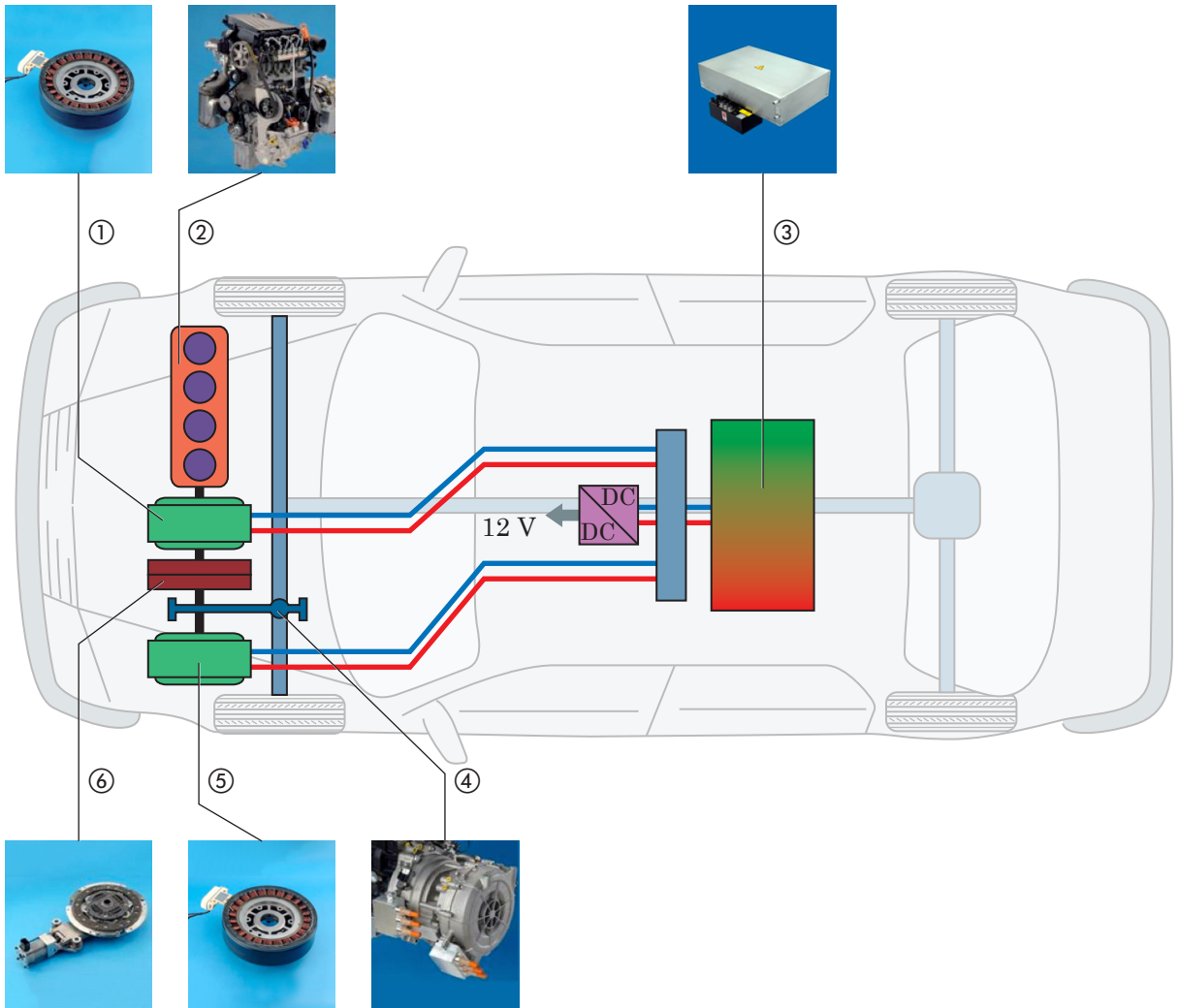
Questo veicolo non ha batterie tali da consentire la ricarica dalla rete o un'architettura propulsori in grado di coprire un ampio campo di utilizzo facendo uso del solo motore elettrico. Ma il veicolo ibrido con la possibilità di collegarsi alla rete elettrica (PHEV, *plug-in hybrid electric vehicle*) ha una capacità di immagazzinare energia in quantità significativamente maggiore degli altri ibridi in modo da cogliere i vantaggi di efficienza del concetto ibrido e l'opportunità di percorrenze discrete utilizzando l'energia recuperata dalla rete. Si tratta di una tecnologia potenzialmente importante per ridurre le emissioni di inquinanti e di CO₂ nei centri urbani perché possono muoversi con il motore elettrico per una certa distanza dopo ciascuna ricarica, da 20 km a 80 km a seconda della capacità della batteria e del rapporto dimensioni/massa del veicolo stesso. Un'autonomia di soli 20 ÷ 80 km potrebbe sembrare limitata, ma in Europa il 50% dei percorsi giornalieri è inferiore a 10 km e l'80%

inferiore a 25 km. Il veicolo ibrido plug-in offre così l'opportunità di affidarsi all'energia elettrica di rete, mantenendo però l'autonomia dei veicoli attuali a combustione interna (*Figura 43.14*). Certo, la complessità dei PHEVs è superiore a quella dei veicoli elettrici per la presenza di due propulsori, motore termico ed elettrico, del sistema di trasmissione e di due elementi di stoccaggio energia, serbatoio carburante e batteria; inoltre la batteria, a parità di capacità, è più costosa, da 1,3 a 1,5 volte rispetto al tipo usato sul veicolo elettrico per la necessità di maggior densità di potenza, tuttavia la minor capacità richiesta ne rende il costo assoluto decisamente inferiore.



- 1 Motore Termico
- 2 Batteria
- 3 Macchina elettrica
- 4 Trasmissione

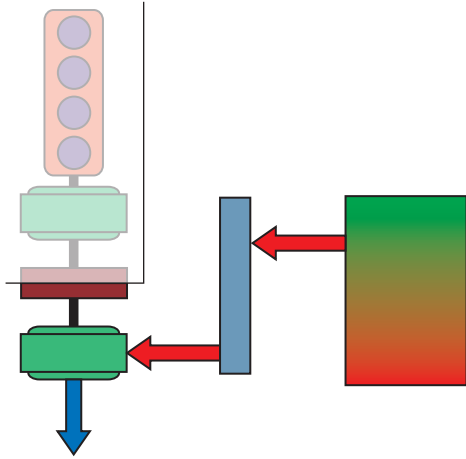
Fig. 43.14-a - Veicolo ibrido plug-in Volkswagen Golf Twin-Drive con autonomia in elettrico (electric range) da 30 a 80 km. Il motore termico è un motore a benzina a iniezione diretta da 1,4 litri di cilindrata. Il veicolo impiega una trasmissione a un solo rapporto e una frizione a controllo elettronico che consente la modalità in puro elettrico e ibrido-serie; è dotato di un pacco batterie agli ioni di litio da 13,2 kWh (capacità nominale: 42 Ah per cella, tensione del pacco: 315 V) oppure da 11,2 kWh (capacità nominale: 37 Ah per cella, tensione del pacco: 302 V).



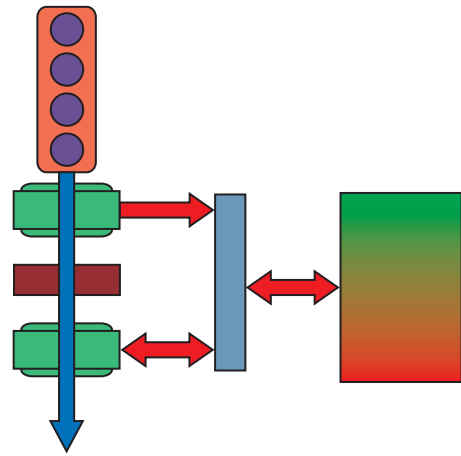
- 1 Generatore elettrico (30 kW e 250 N·m)
- 2 Motore termico da 1,5 litri (75 kW e 250 N·m)
- 3 Batteria (60 kW e 12 kWh)
- 4 Trasmissione con un'unica marcia e rapporto di trasmissione $i = 3$
- 5 Motore/generatore elettrico (85 kW e 650 N·m)
- 6 Frizione (300 N·m)

Fig. 43.14-b - Componenti del veicolo ibrido plug-in Volkswagen Golf Twin-Drive.

Operatività in elettrico



Operatività con motore termico



Potenza $P = 60 \text{ kW}$
$v_{\text{max}} = 120 \text{ km/h}$
Tempo di accelerazione $t_{[0-100 \text{ km/h}]} = 13,5 \text{ s}$
Consumo di energia = $18 \text{ kWh}/100 \text{ km}$
autonomia = $40 \div 50 \text{ km}$

Potenza $P = 85 \text{ kW}$
$v_{\text{max}} = 180 \text{ km/h}$
Tempo di accelerazione $t_{[0-100 \text{ km/h}]} = 11,0 \text{ s}$
Consumo di energia = $4,9 \text{ litri}/100 \text{ km}$ di benzina oppure $(2,5 \text{ litri} + 8 \text{ kWh})/100 \text{ km}$

Fig. 43.14-c - Operatività in elettrico e con motore termico.

SINTESI

La misura è l'elemento da cui si parte per arrivare alla *gestione* del processo che avviene in una macchina o in un impianto. Il *sensore* rileva la grandezza che deve essere tenuta sotto controllo e la trasforma in una grandezza a questa proporzionale. L'*unità centrale* che gestisce l'intero processo confronta il valore della grandezza rilevata dal sensore con un riferimento. L'*attuatore*, elemento finale della catena, provvede a modificare le condizioni operative della macchina o dell'impianto in modo tale da raggiungere il valore atteso della grandezza controllata.

Il *motore ad accensione comandata* viene preso come *esempio della gestione* di una macchina.

I sensori rilevano carico motore, temperatura del fluido di raffreddamento e dell'aria nel collettore di aspirazione, posizione angolare dell'albero motore e giri motore, rapporto aria/combustibile e detonazione.

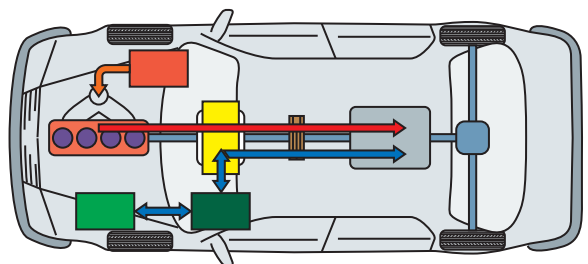
Gli attuatori comandano l'iniezione del combustibile, l'accensione e l'angolo di apertura della farfalla.

Il microprocessore della centralina identifica la richiesta da parte del conducente e calcola domanda di coppia, carica di aria fresca da introdurre nei cilindri, conseguente quantità di combustibile e angolo di accensione.

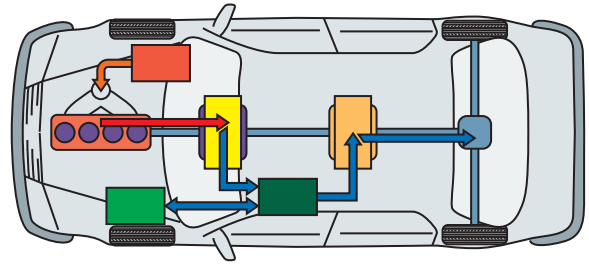
Il veicolo *ibrido-elettrico* ospita un motore a combustione interna e un motore elettrico; la sua caratteristica fondamentale è quella di poter immagazzinare energia in un accumulatore. La richiesta di potenza del guidatore diviene indipendente dalla potenza fornita dal motore termico; il motore termico infatti può fornire una potenza superiore a quella richiesta, nel qual caso l'energia in eccesso verrà immagazzinata nell'accumulatore, o una potenza inferiore, nel qual caso si utilizzerà parte dell'energia precedentemente accumulata.

Obbiettivi dell'ibridazione sono quelli di assistere con la sorgente elettrica il motore termico in modo che possa funzionare nelle condizioni di minori emissioni di CO₂ e di inquinanti e di fornire una coppia elevata anche ai bassi regimi.

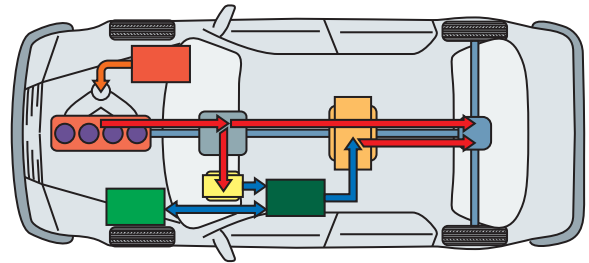
Nell'*ibrido-parallelo*, il motore termico e il motore elettrico sono direttamente collegati alla trasmissione; le energie provenienti dalle due sorgenti, termica ed elettrica, vengono utilizzate parallelamente e la loro somma dà il lavoro speso nella trazione del veicolo.



Nell'*ibrido-serie*, il motore termico aziona solo il generatore elettrico; la potenza elettrica generata è disponibile, insieme a quella del pacco batterie, al motore elettrico che viene utilizzato per la propulsione del veicolo. Questo sistema viene utilizzato come *range extender* per aumentare l'autonomia di veicoli per missioni urbane, come gli autobus.



Nell'*ibrido con ripartizione di potenza*, parte della potenza del motore termico viene convertita in potenza elettrica, mentre la parte rimanente insieme a quella del motore elettrico, alimentato a batteria, viene utilizzata come potenza alle ruote.



Il componente critico del veicolo ibrido è l'*accumulatore* per lo stoccaggio dell'energia elettrica che ha una densità di energia [Wh/kg] di circa un centesimo di quella del combustibile; il costo è inoltre molto alto. Il veicolo ibrido con la possibilità di collegarsi alla rete elettrica (PHEV, *plug-in hybrid electric vehicle*) ha una capacità di immagazzinare energia in quantità significativamente maggiore degli altri ibridi e coglie così i vantaggi di efficienza dell'ibrido e l'opportunità di percorrenze discrete utilizzando l'energia recuperata dalla rete.

VERIFICA DELL'APPRENDIMENTO

1. I tre elementi che caratterizzano la catena di gestione di una macchina o di un impianto sono _____, _____ e _____.
2. Citare alcuni dei principali parametri che devono venire rilevati dai sensori al fine della gestione di un motore ad accensione comandata: _____, _____, _____, _____ e _____.
3. Citare quali sistemi devono essere azionati dagli attuatori nella gestione di un motore ad accensione comandata: _____, _____ e _____.
4. La sonda lambda rileva il rapporto aria/combustibile stechiometrico in modo da poter gestire il catalizzatore tre vie del motore ad accensione comandata.
Vero Falso
5. L'ibrido-idraulico basato su accumulatori idro-pneumatici e sul sistema pompa/motore è più diffuso dell'ibrido-elettrico basato su batterie e motore/generatore elettrico.
Vero Falso
6. Nel veicolo ibrido, il sistema di stoccaggio dell'energia per il motore termico è rappresentato da _____ e per il motore elettrico da _____.
7. I componenti principali dell'ibrido-serie sono _____, _____, _____, _____ e _____.
8. Il rendimento di conversione dell'energia è più alto nel veicolo a propulsione puramente termica di quello del veicolo a propulsione puramente elettrica.
Vero Falso
9. La densità di energia delle batterie più evolute agli ioni di litio sono dell'ordine di:
a) 10 Wh/kg b) 100 Wh/kg c) 1000 Wh/kg d) 10.000 Wh/kg
10. Il veicolo ibrido plug-in è un veicolo che viene ricaricato collegandosi alla rete elettrica.
Vero Falso